

DISEÑO DE UN ROBOT INDUSTRIAL TIPO SERIAL
PARA APLICACIÓN DE PINTURA.

RICARDO ANDRES JARA BEDOYA.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA.
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA.
PEREIRA, RISARALDA.

2020

DISEÑO DE UN ROBOT INDUSTRIAL TIPO SERIAL
PARA APLICACIÓN DE PINTURA.

RICARDO ANDRÉS JARA BEDOYA.

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO.

PROFESOR GUÍA:
MAURICIO MONROY JARAMILLO.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA.
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA.
PEREIRA, RISARALDA.

2020

CONTENIDO.

INTRODUCCIÓN.	6
JUSTIFICACIÓN.....	9
OBJETIVO GENERAL.	10
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	10
METODOLOGÍA.....	11
RESULTADOS.....	13
I.ESPACIO DE TRABAJO:.....	13
II.MODELADO EN SOLIDWORKS DEL BRAZO ROBÓTICO.....	14
III.SELECCIÓN DE MATERIAL.....	19
IV. ANALISIS CINÉTICO.....	20
V. ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	23
VI. DISEÑO SISTEMA DE CONTROL.....	31
CONCLUSIONES.....	48
BIBLIOGRAFÍA:	49
ANEXOS.....	51

LISTA DE FIGURAS.

Figura 1. Espacio de trabajo-Vista superior.....	13
Figura 2. Espacio de trabajo-Vista lateral.....	14
Figura 3 Brazo Robot para aplicación de pintura, Vista isométrica.....	15
Figura 4. Ubicación del brazo robótico.	15
Figura 5. Eslabón 1.....	16
Figura 6. Eslabón 2.....	16
Figura 7. Eslabón 3.....	17
Figura 8. Eslabón 4.....	17
Figura 9. Eje para articulación 2,3 y 4.....	18
Figura 10. Pasador de sujeción.....	18
Figura 11 Determinación del par.....	20
Figura 12. Posición más crítica, brazo extendido.....	21
Figura 13. Tensiones del brazo robótico.....	24
Figura 14. Desplazamientos del brazo robótico.	24
Figura 15. Deformación unitaria del brazo robótico.	25
Figura 16. Ubicación de servomotores	26
Figura 17. Par servomotor 1 (base).	27
Figura 18. Par servomotor 2. (articulación del hombro).	27
Figura 19. Par servomotor 3. (articulación del codo).....	28
Figura 20. Par servomotor 4. (articulación de la muñeca).....	28
Figura 21. Tensiones brazo robótico.	29
Figura 22. Desplazamientos brazo robótico.....	30
Figura 23. Factor de seguridad.....	30
Figura 24. Plano eléctrico.	34
Figura 25. Puntos y camino seleccionado.....	35

LISTA DE TABLAS.

Tabla 1. Configuraciones geométricas, estructura cinemática, espacio de accesibilidad y ejemplos de robots industriales [5].....	8
Tabla 2. Selección del material para el brazo robótico.....	19
Tabla 3. Cálculos para masa equivalente de articulación hombro.	21
Tabla 4. Cálculos para masa equivalente de articulación codo.....	22
Tabla 5. Centro de masa y par necesario de servomotor codo.....	22
Tabla 6. Cálculos para masa equivalente de articulación de la muñeca.....	22
Tabla 7. Centro de masa y par necesario de servomotor de muñeca.....	22
Tabla 8. Factores de seguridad por elemento.....	25
Tabla 9. Servomotores seleccionados.....	32
Tabla 10. Selección controladores [15]	33
Tabla 11. Ángulos para los servomotores en todos los puntos.	37

INTRODUCCIÓN.

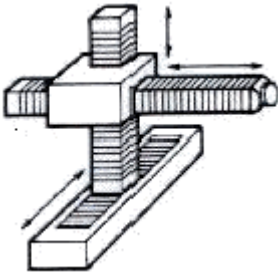

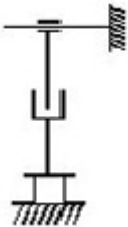
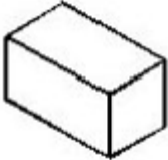
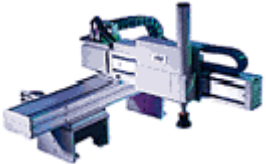
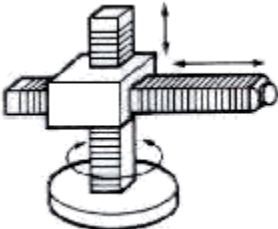
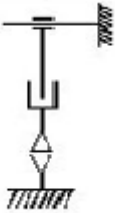



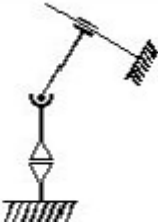


La industria manufacturera del mundo, ha venido buscando en los últimos años la manera de mejorar la exactitud, adaptabilidad y confiabilidad en sus procesos y para ello se ha implementado el uso de robots, con los cuales está comprobado el incremento de productividad en los procesos [1].

Según la asociación de industrias de robótica (RIA, *robotic industry association*), un robot industrial es: “un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materias, piezas, herramientas, dispositivos espaciales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas”. y estos suelen ser llamados brazos robóticos por la analogía que se puede establecer en algunos casos con las extremidades superiores del cuerpo humano.

En la actualidad los robots industriales se pueden clasificar según su tipo de cadena cinemática en serial o paralelo. Los robots de tipo serial son caracterizados como un mecanismo antropomórfico de cadena cinemática abierta que está formado por eslabones unidos por articulaciones rotacionales de un grado de libertad [2]. Por otro lado, los robots paralelos se caracterizan como un mecanismo de cadena cinemática cerrada y gracias a esto son más rápidos, exactos y presentan baja inercia, sin embargo, tienen una desventaja y es un menor espacio de trabajo respecto al robot serial. Este tipo de robot es mayormente utilizado en tareas de pick and place [3].

Un conjunto de eslabones y articulaciones se denomina cadena cinemática, y es una cadena cinemática abierta cuando cada eslabón se conecta únicamente al eslabón anterior y al siguiente, con la excepción del primer eslabón, que irá conectado a un soporte generalmente y el último eslabón que en su extremo quedará libre. Una cadena cinemática cerrada es en la cual se pueden observar diferentes lazos conectados a un último eslabón [4].

Otra forma de catalogar los robots industriales es según su clasificación geométrica, los cuales pueden ser cartesianos, polares, cilíndricos, esférico, SCARA y paralelo.

Configuración geométrica	Estructura cinemática	Espacio de trabajo	Ejemplo
<p>cartesianos</p>  <p>tipo cantiléver</p>  <p>tipo pórtico</p>			
<p>cilíndrico</p> 			
<p>polar</p> 			

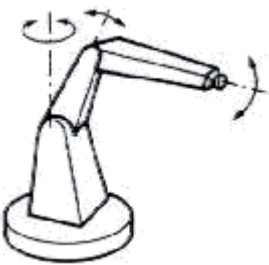




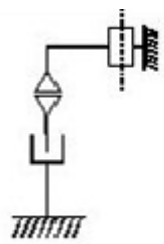
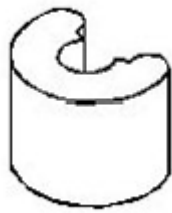


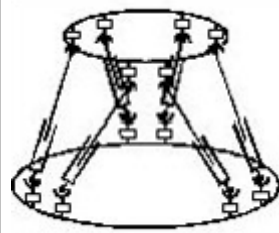


<p>esférico</p> 			
<p>SCARA</p> 			
<p>paralelo</p> 			

Tabla 1. Configuraciones geométricas, estructura cinemática, espacio de accesibilidad y ejemplos de robots industriales [5].

En la tabla 1 se tiene una ilustración sencilla de las configuraciones geométricas, al igual de su estructura cinemática, un estimado de la forma del espacio de trabajo de cada tipo de robot y unos ejemplos de robots industriales actuales.

En este proyecto se realizará el diseño de un robot industrial tipo serial para pintura, es decir, un mecanismo con cadena cinemática abierta o de tipo esférico según su clasificación geométrica (Tabla 1.), el cual tiene un amplio espacio de trabajo y es frecuentemente utilizado en las líneas de ensamblado y diferentes procesos en la industria a gran escala y cada vez más en las pequeñas empresas que buscan automatizarse, ya que puede cumplir diferentes tareas con facilidad. En este caso, el robot tendrá la tarea de rociar con pintura a diferentes objetos en un taller de fabricación de muebles, camas y demás objetos en madera, aluminio y acero forjado.

JUSTIFICACIÓN.

En un taller de ebanistería se construyen diariamente muebles y demás objetos que requieren un acabado con pintura. Para ello un trabajador invierte su tiempo realizando esta tarea repetitiva, que en algunos casos es ardua y estresante. Cuando se deben pintar unas pocas piezas, la tarea no representa ningún problema, pero cuando son decenas o centenas, se presentan los siguientes problemas:

La exactitud en una tarea repetitiva ejercida por un trabajador humano se verá afectada por el agotamiento natural de una larga jornada [6], este agotamiento no lo tendrá un robot y por lo tanto su exactitud no se verá afectada, al igual que la velocidad con que se ejecutan estas tareas.

En muchas empresas actualmente, la manipulación de gases o líquidos nocivos a lo largo de un proceso afectan la salud a corto o largo plazo de los operarios [7], en cambio, la implementación de robots al proceso puede reducir estas afectaciones. En este caso la manipulación de pinturas, selladores y disolventes generan problemas respiratorios que con el robot pintor se evitarán.

Se puede observar que la mayor parte de problemas a solucionar son los que generan afectaciones a la salud de los trabajadores. Sin embargo, la mejoría en exactitud, velocidad, confiabilidad, adaptabilidad, disminución en tiempo de proceso y capacidad de realizar una manufactura más compleja, son aspectos muy importantes a tener en cuenta.

El diseño de este robot pintor va dirigido al taller de la familia de quien presenta esta propuesta, en el cual se ha observado la totalidad de estos problemas mencionados.

OBJETIVO GENERAL.

- Diseñar un prototipo de robot tipo serial o de cadena cinemática abierta para aplicación de pintura en un taller de ebanistería.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Establecer espacio de trabajo y requerimientos técnicos necesarios para el diseño del robot.
- Realizar un modelo CAD en la herramienta SolidWorks del robot con el fin de definir la estructura del robot y generar planos de construcción.
- Validar virtualmente la integridad estructural del diseño mediante la herramienta ANSYS, con el fin que el robot soporte satisfactoriamente las condiciones de carga.
- Realizar el sistema de control del robot con un lenguaje apropiado.

METODOLOGÍA.

Espacio de trabajo:

La metodología a utilizar será en un principio determinar el espacio de trabajo necesario para el correcto funcionamiento del robot pintor, el cual está definido como el grupo de puntos que pueden ser alcanzados por una herramienta de sujeción, de soldadura, de pintura, etc. El punto más significativo del elemento terminal se denomina punto terminal (PT). En el caso de una pinza, el punto terminal vendría a ser el centro de sujeción de la misma. [8] y con base en éste determinar la longitud de los eslabones.

Modelado en SolidWorks:

Realizar el modelado de cada pieza del robot en la herramienta SolidWorks para así definir su estructura, dimensiones y forma con base a la longitud de los eslabones ya determinada. Luego se procederá a seleccionar un material mediante una matriz de selección en la que se tendrán en cuenta aspectos como resistencia, precio y masa del material con el cual se construiría cada pieza del robot. Con esto ya realizado, la herramienta SolidWorks entregará un estimado de la masa, centro de masa y de los momentos de inercia de cada pieza y del mecanismo entero.

Análisis cinético:

Teniendo los datos de masa de cada eslabón, centro de masa, momentos de inercia y con base en la masa del objeto que el robot tiene que mover, esto es, la pistola de pintura neumática junto con el tanque de pintura, se realizará un análisis cinético del mecanismo para así determinar los pares necesarios para que el robot funcione satisfactoriamente y así poder realizar la correcta selección de los actuadores que en este caso serán servomotores.

Análisis estructural:

Se validará la integridad estructural de cada pieza del robot y del mecanismo completo. Esto se hará mediante la herramienta virtual ANSYS en la que se insertarán los modelos ya realizados y con las condiciones de carga necesarias para el correcto funcionamiento del robot. Si la herramienta ANSYS entrega fallas en la integridad del mecanismo se procederá a realizar de nuevo la selección del material.

Diseño del sistema de control:

Para el sistema de control primero se hará la selección de los motores mediante una matriz de selección teniendo en cuenta los valores de par necesario obtenidos anteriormente, velocidad, fuerza, control, exactitud y precio. Luego se hará la selección del controlador nuevamente mediante una matriz de selección en las que se tendrán en cuenta aspectos como robustez, facilidad en la programación y precio. A continuación, se procederá a realizar el plano eléctrico necesario para hacer la conexión de los motores y sensores seleccionados, por último, se hará el programa que controlará los movimientos del robot en el lenguaje adecuado.

RESULTADOS

I.ESPACIO DE TRABAJO:

El espacio de trabajo se determinó teniendo en cuenta diferentes aspectos, tales como el tamaño máximo de las piezas manejadas en el taller de ebanistería y la distancia recomendada a la que se debe realizar la aspersión de pintura y al ángulo que pueden manejar los servomotores. La pieza más grande manejada es una puerta de madera para diferentes aplicaciones de 2 m de largo y 0,75 m de ancho, la distancia recomendada por expertos para la aspersión de pintura es de aproximadamente 25-30 cm [9], se debe tener en cuenta que la pistola debe de estar a 90 grados de la superficie que se va pintar y el ángulo que manejan los servomotores es generalmente de 0 a 180 grados.

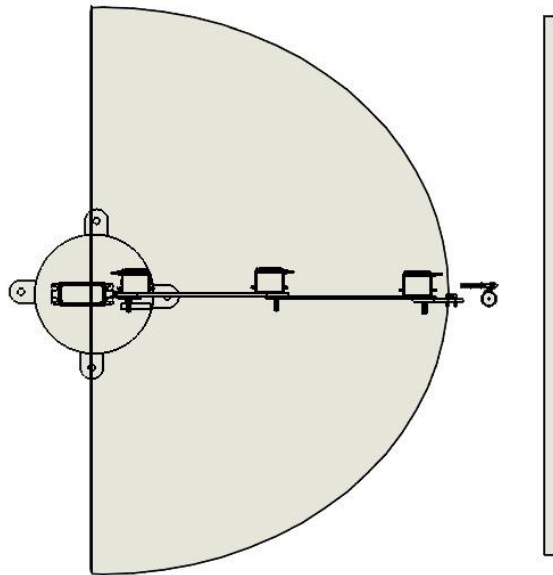


Figura 1. Espacio de trabajo-Vista superior.

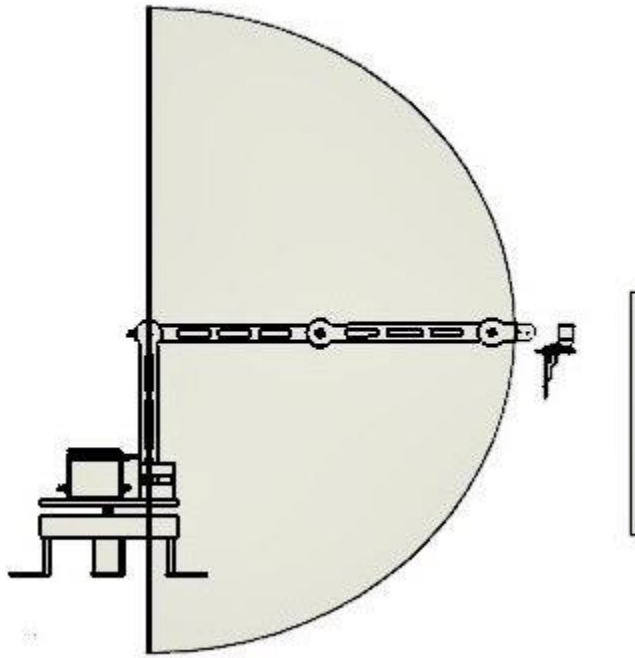


Figura 2. Espacio de trabajo-Vista lateral.

En la figura 1 vista superior se puede observar que, por el movimiento rotacional de la base, la herramienta final describe un arco de radio 1,20 m y en la figura 2 vista lateral el movimiento del hombro con el brazo completamente extendido describe un arco de la misma magnitud.

II.MODELADO EN *SOLIDWORKS* DEL BRAZO ROBOTICO.

Se llama mecanismo a un sistema de cuerpos creado artificialmente y destinado a transformar el movimiento de uno o varios cuerpos en el movimiento exigido de otros cuerpos. Todo mecanismo se compone de varios cuerpos separados (piezas) y Cada pieza móvil o grupo de piezas, que conforman un sistema rígido de cuerpos se denomina eslabón móvil del mecanismo [10].

La unión de dos cuerpos que se tocan y que permite el mutuo movimiento relativo de ellos se llama par cinemático o junta cinemática y un sistema de eslabones unidos entre sí por medio de pares cinemáticos, se denomina cadena cinemática y estos pares cinemáticos se clasifican en esfera-plano, esfera-cilindro, esférica o rotula, plana, cilíndrica, rotula con pasador, prismático, rotación, y helicoidal [10].

El diseño del brazo robótico para aplicación de pintura consta de cuatro eslabones, estos eslabones estarán unidos por medio de cuatro articulaciones con par cinemático rotacional.

El brazo robótico estará sobre una base fija, pero la torreta tendrá movimiento rotacional. En cada articulación irán ubicados los servomotores correspondientes, el motor de la base de la torreta fue ubicado de tal manera que actúe como contrapeso.

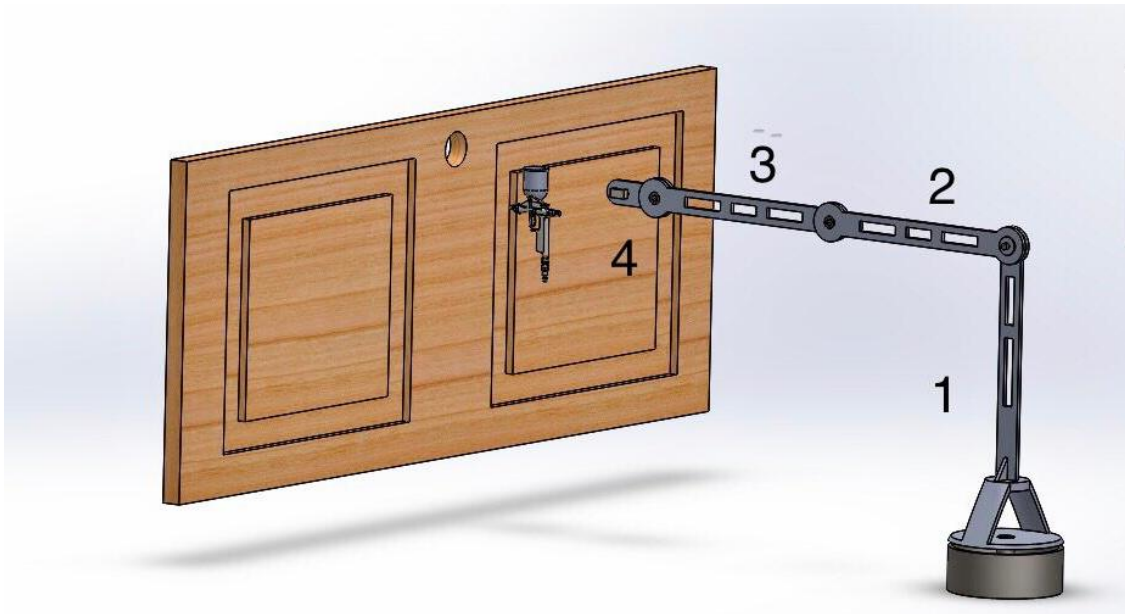


Figura 3 Brazo Robot para aplicación de pintura, Vista isométrico.

En la figura 3 se puede observar el diseño del brazo robótico, el eslabón 4 se agregó para que tenga la función específica de mantener la pistola de pintura a 90° de la superficie que se va pintar.

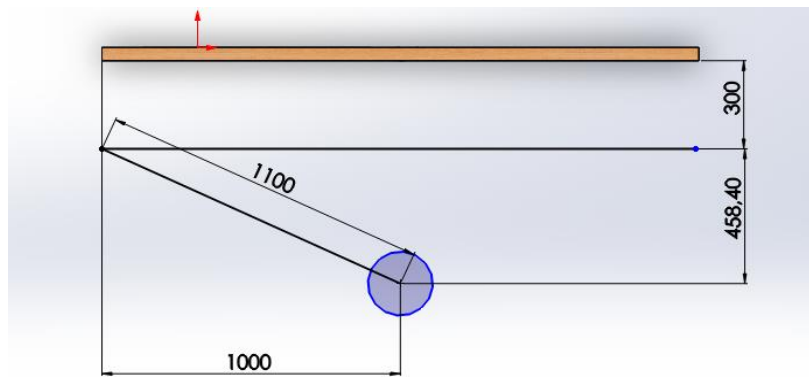


Figura 4. Ubicación del brazo robótico.

El brazo robotico tiene que ubicarse a 758 mm de distancia perpendicular, aproximadamente, de la puerta que va ser pintada, esto con el fin de que el brazo pueda alcanzar todos los puntos y que la puerta que se va pintar quede dentro del espacio de trabajo y que a su vez se conserven los 30 cm de distancia recomendados entre la pistola y la puerta [9]. Como se puede observar en la figura 7, la suma de la longitud de los 3 eslabones no debe ser menor a 1100 mm, es por ello que se determinó que la longitud de los eslabones 2 y 3 será de 500 mm y la del eslabón 4 de 100 mm.

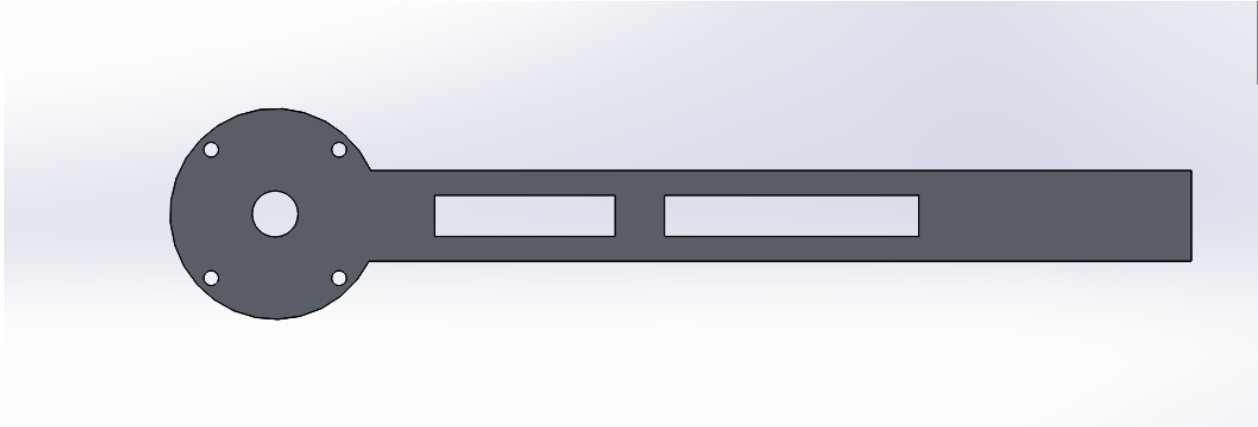


Figura 5. Eslabón 1.

En la figura 5 se puede observar el eslabón 1, el cual tiene la función de aumentar el espacio de trabajo del brazo robot y así este pueda alcanzar con facilidad todos los puntos a pintar, la ubicación de los orificios se determinó mediante la guía de instalación del servomotor. [11]

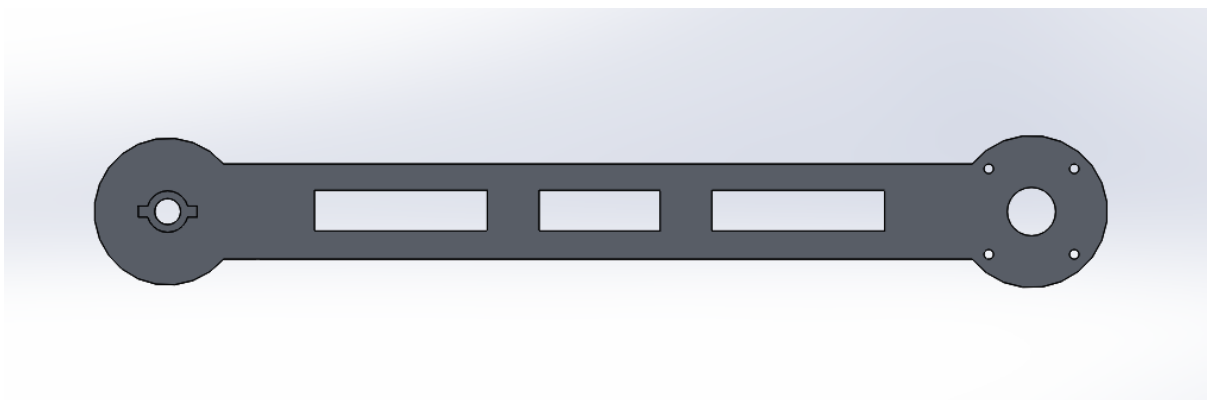


Figura 6. Eslabón 2.

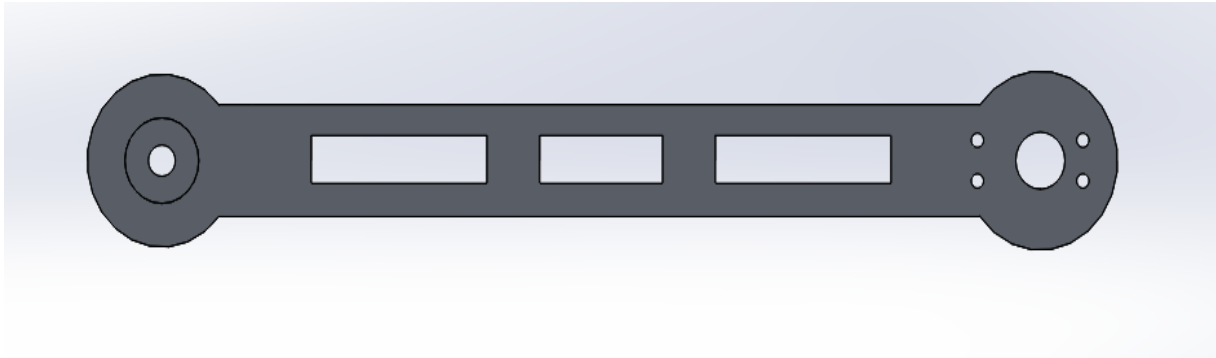


Figura 7. Eslabón 3.

En la figura 6 y 7 se puede observar el eslabón 2 y 3, los cuales tienen las mismas dimensiones, con excepción de la ubicación y los diámetros de los orificios que asegurarán los respectivos servomotores al brazo robótico. Estos eslabones tendrán una longitud de 0,50 m cada uno y están calculados con el fin de que puedan alcanzar todos los puntos en el espacio de trabajo.

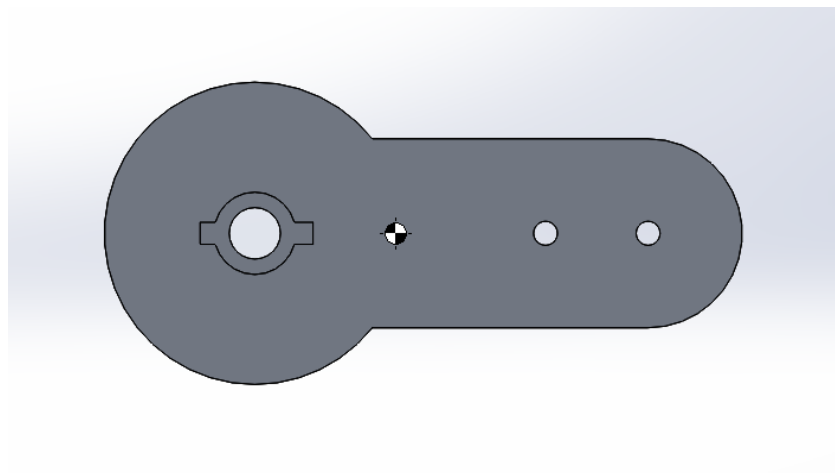


Figura 8. Eslabón 4.

El eslabón 4 de la figura 9 tiene la función específica de mantener la pistola de pintura perpendicular a la superficie que se va pintar. La longitud de 100 mm, necesaria para completar la distancia de 1100 mm, es medida desde el centro del agujero hasta el punto medio donde va ir la pistola de pintura, esta pistola de pintura estará asegurada con el pasador mostrado a continuación en la figura 10.

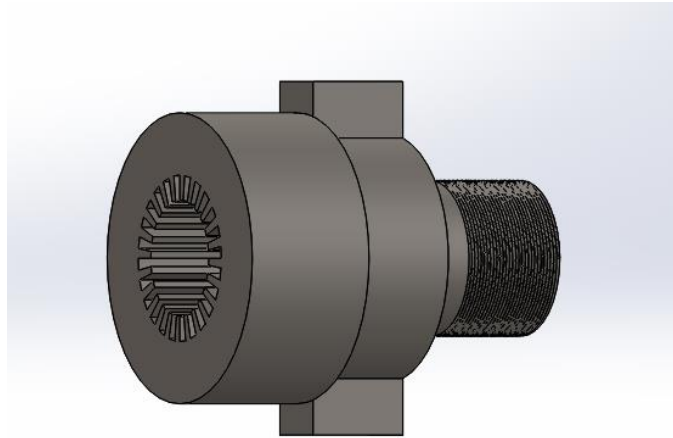


Figura 9. Eje para articulación 2,3 y 4.

La unión de los eslabones y la transmisión de la potencia del servomotor se hará por medio del eje mostrado en la figura 9, este eje tendrá una rosca estándar que por defecto el programa *SolidWorks* incorpora y será de acero AISI 1010, esto con el fin de que tenga mayor resistencia que los otros componentes del ensamblaje.

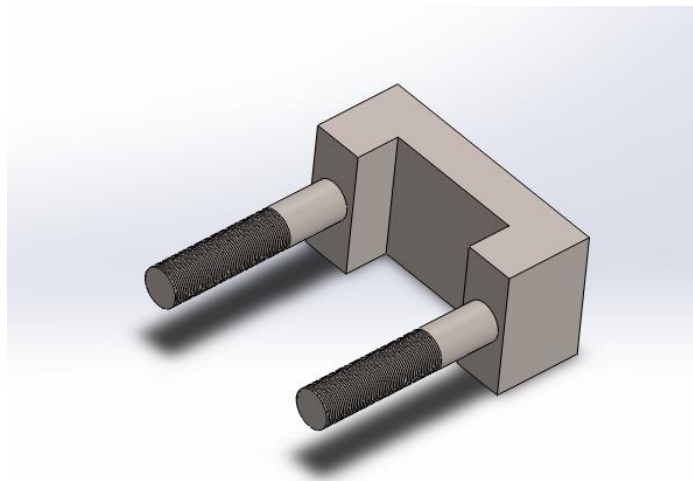


Figura 10. Pasador de sujeción.

El pasador de sujeción tendrá la función de mantener la pistola de pintura asegurada al brazo robótico y permitir un fácil desensamblaje de la pistola al momento de cambiar la pintura, realizar una limpieza o cambiar alguna pieza.

III. SELECCIÓN DE MATERIAL.

Para la selección del material del brazo robótico se procedió a exponer ventajas y desventajas de materiales de uso común, y fácil acceso para así llegar a la mejor opción.

MATERIAL	VENTAJAS	DESVENTAJAS
AISI 304	<ul style="list-style-type: none">• Alta resistencia térmica y a la corrosión.• Resistencia a la fluencia 205 MPa.	<ul style="list-style-type: none">• Los aceros inoxidable tienen un costo mayor respecto a los otros aceros.
AISI 1020	<ul style="list-style-type: none">• Bajo costo.• Resistencia última 380 MPa• Resistencia a la fluencia 210 MPa.	<ul style="list-style-type: none">• No apto para ambientes corrosivos.• Menor resistencia respecto al AISI 1045.
AISI 1045	<ul style="list-style-type: none">• Mayor dureza respecto a los aceros con menor contenido de carbono.• Resistencia última 570 MPa.• Resistencia a la fluencia 310 MPa.• Bajo costo.	<ul style="list-style-type: none">• No apto para ambientes corrosivos.
ALUMUNIO	<ul style="list-style-type: none">• Maleable, Fácil maquinado.• Resistente a la corrosión.• Resistencia ultima 250 MPa.• Resistencia a la fluencia 110 MPa.• Baja densidad y peso.	<ul style="list-style-type: none">• Menor resistencia.• Punto de fusión muy bajo.

Tabla 2. Selección del material para el brazo robótico.

El aspecto más importante para la selección del acero es la importancia del ambiente al que el brazo robot será sometido. El robot estará en contacto permanente con pinturas, selladores y disolventes

industriales, los cuales son potencialmente corrosivos. De la tabla 2, se puede observar que los materiales con una alta resistencia a la corrosión son el acero AISI 304 y el aluminio.

El segundo aspecto importante es el económico, y de la tabla 2 se puede evidenciar que los aceros al carbono AISI 1020 y AISI 1045 tienen una buena resistencia y bajo costo entre sus ventajas, pero para un ambiente corrosivo no son aptos, si bien se pueden utilizar pinturas anticorrosivas para evitar el contacto del fluido con el acero, esto aumentará el costo, ya que tienen que ser pintado cada cierto tiempo.

El acero inoxidable AISI 304 es un acero austenítico con resistencia a la corrosión alta, sin embargo, los aceros cuentan con una densidad y peso similar y este es mucho mayor respecto al del aluminio y su desventaja mayor es el alto costo [12].

El material seleccionado de la tabla 2 es el aluminio ya que una de sus principales ventajas es su alta resistencia a la corrosión y su bajo peso y densidad, si bien, es menos resistente respecto a los aceros en los aspectos más importantes para esta aplicación, los cuales son resistencia ultima y a la fluencia, son valores aceptables.

IV. ANALISIS CINÉTICO.

Para la determinación del par necesario en los servomotores para mover el brazo robótico satisfactoriamente se calculó una masa equivalente respecto a cada articulación con las masas y los centros de masa de los eslabones y de la pistola de pintura ya entregadas por la herramienta virtual SolidWorks.

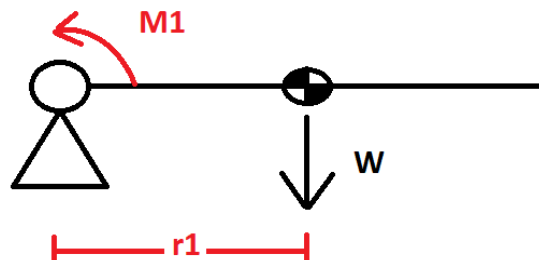


Figura 11 Determinación del par

$$M1 = r1 \times W \quad [13]$$

Para la articulación del hombro se calculó la masa equivalente en la posición más crítica, la cual es con el brazo totalmente extendido (Figura 12) y, además, con el recipiente de la pistola de pintura totalmente lleno.

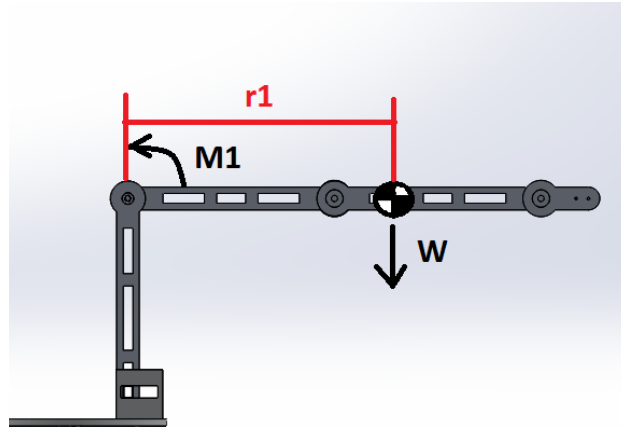


Figura 12. Posición más crítica, brazo extendido.

Para calcular la masa equivalente se empleó la siguiente tabla.

Eslabón	Masa (g)	Distancia centro de masa (cm)	ximi
2	751,79	25	18794,75
3	748,52	75	56139
4	361,95	104,32	37758,624
pistola	1250	110	137500
Total	3112,26	314,32	250192,374

Tabla 3. Cálculos para masa equivalente articulación hombro.

La masa equivalente es la sumatoria de las masas de todo el brazo, pero la ubicación del centro de masa es.

$$Xc = \frac{\sum ximi}{\sum mi} = \frac{250192,374 \text{ g cm}}{3112 \text{ g}} = 80,39 \text{ cm} = 0,8039 \text{ m}$$

$$W = M \times g = 3,112.26 \text{ Kg} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 30,53 \text{ N}$$

$$M1 = r1 \times W = 0,8039 \times 30,53 \text{ N} = 24,54 \text{ Nm}$$

El par necesario para el servomotor de la articulación, en la posición más crítica es de 24,54 Nm. Cuando el brazo no está extendido, el par necesario será menor, sin embargo, se tiene que garantizar un correcto funcionamiento para la posición más crítica.

Para la articulación del codo se calculó.

Eslabón	Masa (g)	Distancia centro de masa (cm)	ximi
3	748,52	25	18713
4	361,95	54,32	19661,124
pistola	1250	60	75000
total	2360,47	139,32	113374,124

Tabla 4. Cálculos para masa equivalente articulación codo.

Xcm	48,0303177	Xc(m)	0,480303177
peso w(N)	23,1562107	Par necesario arct brazo (Nm)	11,11

Tabla 5. Centro de masa y par necesario servomotor codo.

En la tabla 4 y tabla 5 se hizo el mismo procedimiento anterior para calcular el par necesario en el servomotor del codo, el cual fue de 11,11 Nm.

Para la articulación de la muñeca.

Eslabón	Masa (g)	Distancia centro de masa(cm)	ximi
4	361,95	4,32	1563,624
pistola	1250	10	12500
total	1611,95	14,32	14063,624

Tabla 6. Cálculos para masa equivalente articulación muñeca.

Xcm	8,72460312	X(m)	0,08724603
Peso w(N)	15,8132295	Par necesario artic muñeca	1,3796

Tabla 7. Centro de masa y par necesario servomotor muñeca.

En la tabla 6 y tabla 7 se calculó la masa equivalente, la distancia al centro de masa y el par necesario para el servo de la muñeca el cual fue de 1,37 Nm.

V. ANALISIS ESTRUCTURAL.

El análisis estructural se realizó con la herramienta virtual *SolidWorks*, ya que este cuenta con licencia estudiantil de fácil acceso, además, permite importar los modelos anteriormente realizados directamente y para realizar los cálculos necesarios necesita menor capacidad computacional respecto a *ANSYS*.

Una ventaja importante de *ANSYS* es la posibilidad de controlar perfectamente la malla para cada elemento, en *SolidWorks* esto no es posible, solo se puede controlar el tamaño de esta y su refinamiento.

La principal ventaja de *SolidWorks* es el tiempo de calculo y los mensajes que obligan a corregir las piezas, las restricciones y las conexiones entre ellas desde el principio, para así al final mostrar un resultado correcto. En *ANSYS* así no esté bien restringido el modelo, el programa generará resultados que pueden no ser correctos y que de no serlo necesitarán de alguien experto para identificar las fallas o la realización de cálculos de escritorio.

De igual forma los resultados obtenidos entre *ANSYS* y *SolidWorks* no deben variar de una forma significativa.

Análisis estático:

Para el análisis estático se usó el complemento *Simulation* de la herramienta virtual *SolidWorks*. En este, el programa calculó las tensiones, desplazamientos, deformaciones unitarias y factores de seguridad para cada uno de los elementos, con las condiciones de carga ya obtenidas.

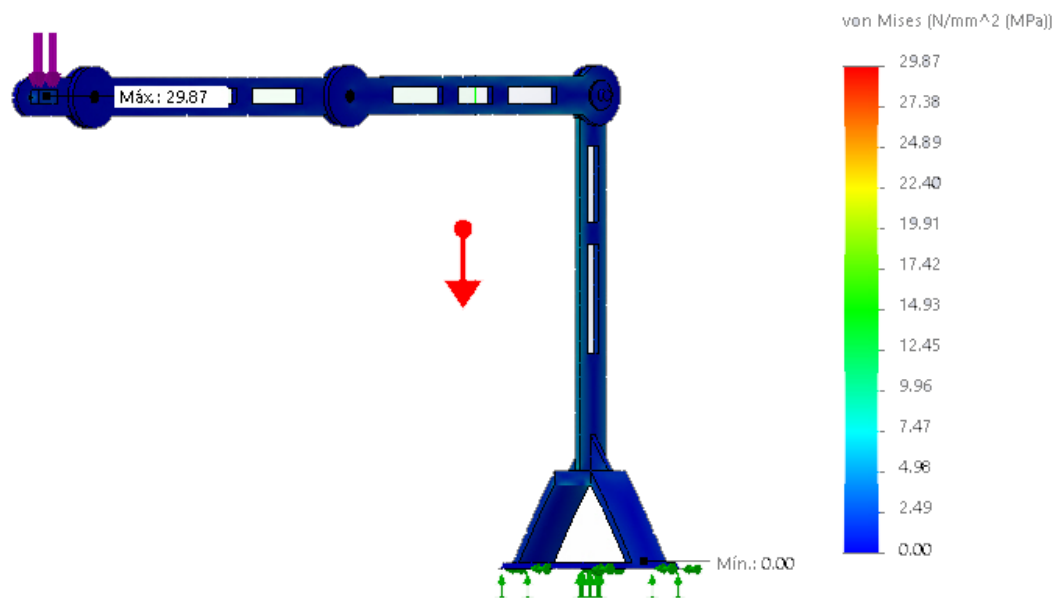


Figura 13. Tensiones brazo robótico.

Para el cálculo de las tensiones en el brazo robótico se seleccionó la opción de que éste se hallase con la teoría de tensión de Von Mises, la cual es la recomendada para materiales dúctiles [14], los valores máximos y mínimos obtenidos se muestran en la figura 13 y están dados en MPa.

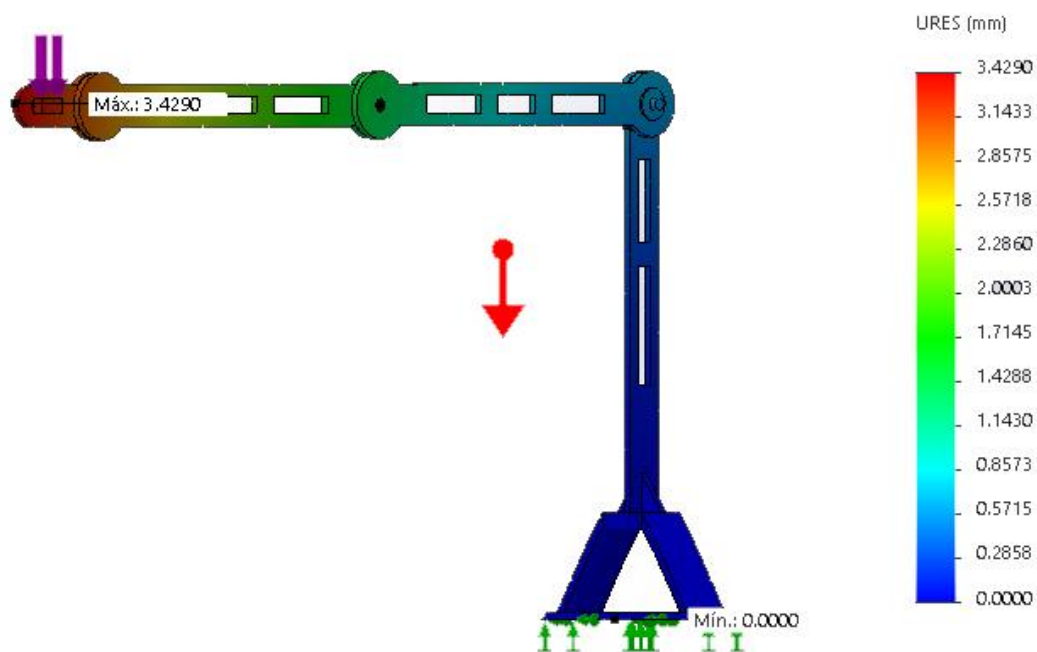


Figura 14. Desplazamientos brazo robótico.

Para el cálculo de los desplazamientos del brazo robótico, el programa por defecto lo hace en mm. En la figura 14 se puede observar que el desplazamiento máximo será vertical, de 3,429 mm y es medido respecto al eslabón 1, que no tiene desplazamiento vertical, está ubicado en la punta del eslabón 4 y es causado por el peso de la pistola de pintura.

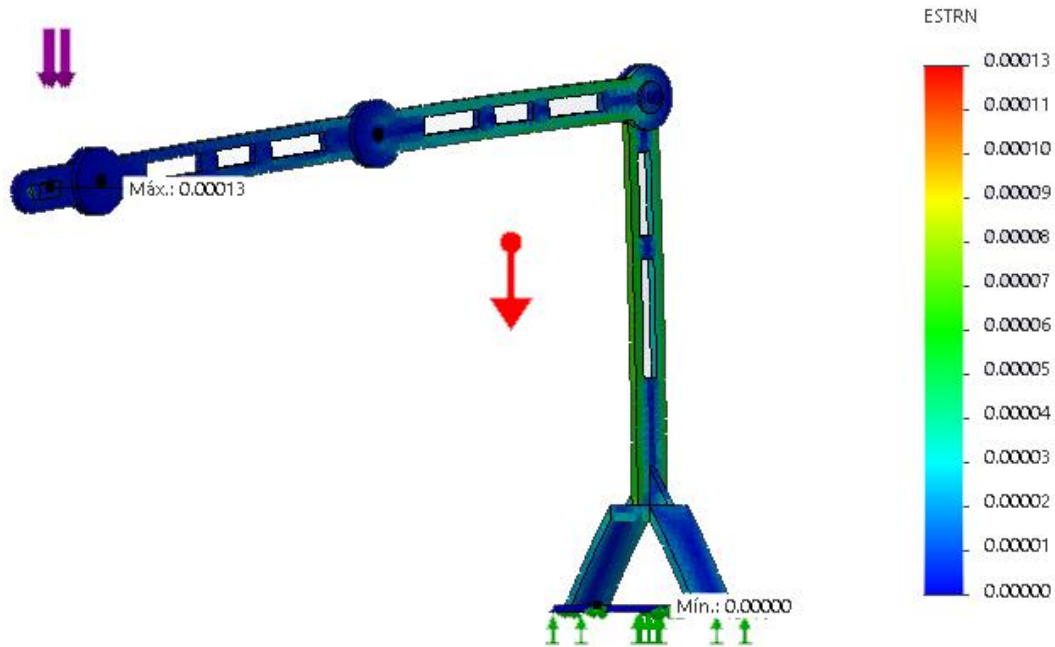


Figura 15. Deformación unitaria del brazo robótico.

Para la deformación unitaria el programa tiene la opción de aumentar la escala para una fácil visualización, así como se puede observar en la figura 15, el valor máximo será de 0,00013 por unidad de longitud.

Elemento.	Factor de seguridad mínimo.
Base.	7,539
Soporte	9,597
Eslabón 1	4,712
Eje 1	6,379
Eslabón 2	6,644
Eje 2	11,426
Eslabón 3	14,259
Eje 3	78,803
Eslabón 4	4,463
Seguro pistola	9,776

Tabla 8. Factores de seguridad por elemento.

En la tabla 8 se pueden observar los factores de seguridad entregados por el simulador de *SolidWorks*. Estos fueron calculados con el criterio de falla de teoría de tensión de Von mises, o también llamada teoría de energía de distorsión máxima, para materiales dúctiles y estableciendo el límite de tensión igual al límite elástico del material en las opciones de cálculo del programa. El factor de seguridad mínimo de todo el brazo robótico está ubicado en el eslabón 4, en los orificios para el sujetador de la pistola y este es de 4,5 aproximadamente, Esto significa que el brazo robótico puede soportar satisfactoriamente hasta 4,5 veces las cargas planteadas.

Análisis dinámico.

Para el análisis dinámico se usó el complemento *Motion* y análisis del movimiento de la herramienta virtual *SolidWorks*. En este se procedió a ubicar cada uno de los servomotores como se muestra a continuación.

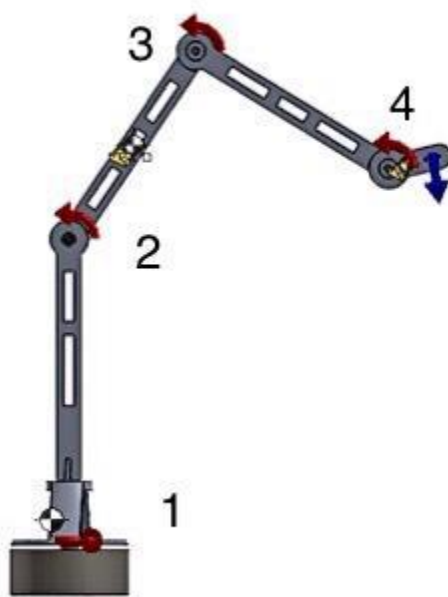


Figura 16. Ubicación de servomotores

Al ubicar cada uno de los servomotores como se observa en la figura 16 el análisis de movimiento ya puede ser generado, se selecciona la opción de segmentos para que cada servomotor siga el camino determinado en la tabla 11 (ángulos para servomotores.)

Para que la simulación sea mucho más real, se inserta la gravedad al modelo que por defecto es de $9,80665 \text{ m/s}^2$. Para los contactos entre piezas el programa pide el material de éstos y calcula las fuerzas de fricción para contactos sin lubricación. A su vez, se añade el peso de la pistola de pintura, con su respectivo tanque de almacenamiento de pintura y por ultimo se corre la simulación.

Los primeros resultados obtenidos son los pares en los servomotores, estos cálculos para las condiciones de carga suministradas en el modelo y se muestran a continuación para el servomotor 1.

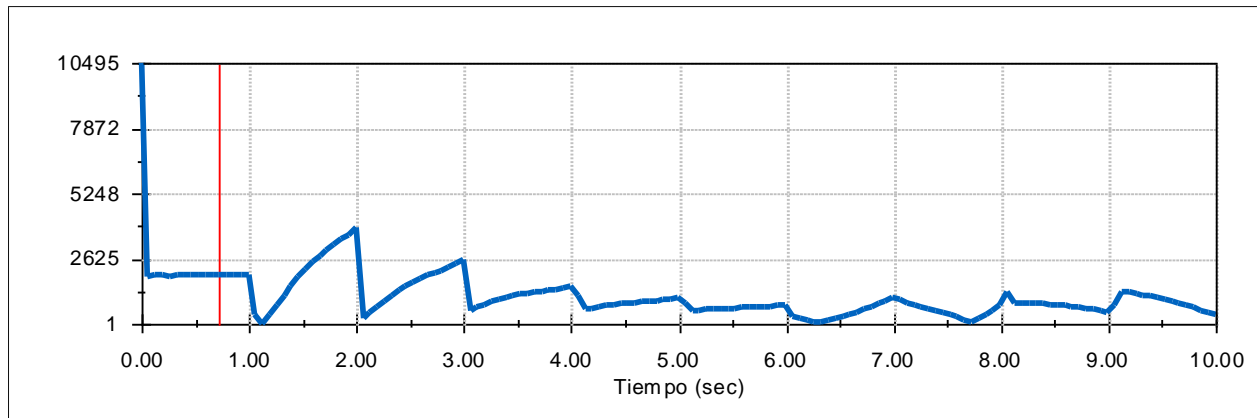


Figura 17. Par servomotor 1 (base).

Para el par necesario en el servomotor 1, se puede observar en la figura 17 un pico de 10,5 Nm aproximadamente. Aunque los valores promedio son mucho menores, el servomotor a seleccionar tendrá que cumplir con todas las condiciones para un correcto funcionamiento.

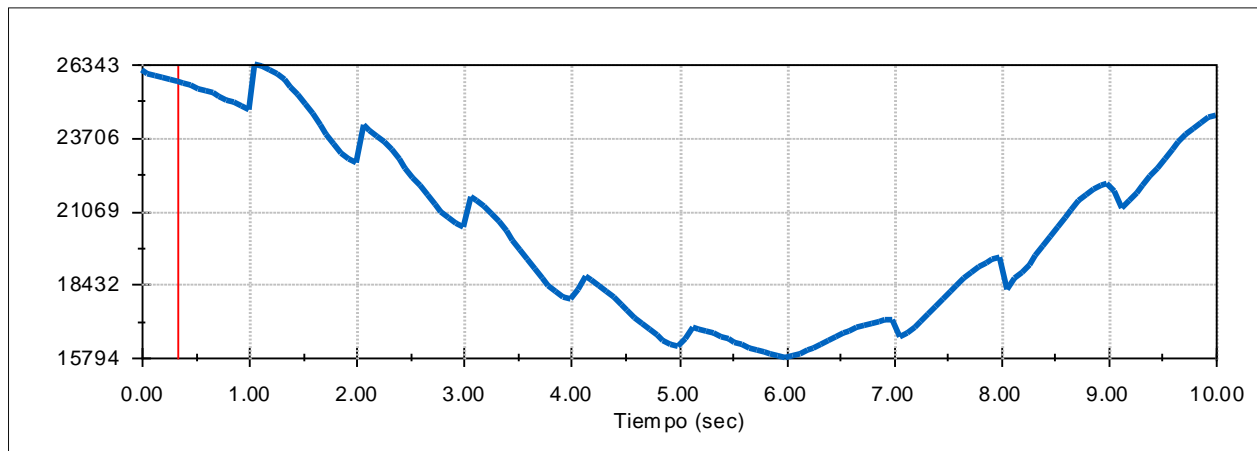


Figura 18. Par servomotor 2. (articulación del hombro).

Para el par necesario en el servomotor 2, se puede observar un pico de 26,4 Nm en los primeros segundos de funcionamiento, el cual corresponde a la posición mas crítica del brazo robótico, la cual es con las articulaciones completamente extendidas. El servomotor tendrá que tener un par mínimo de 26,4 Nm para así funcionar correctamente.

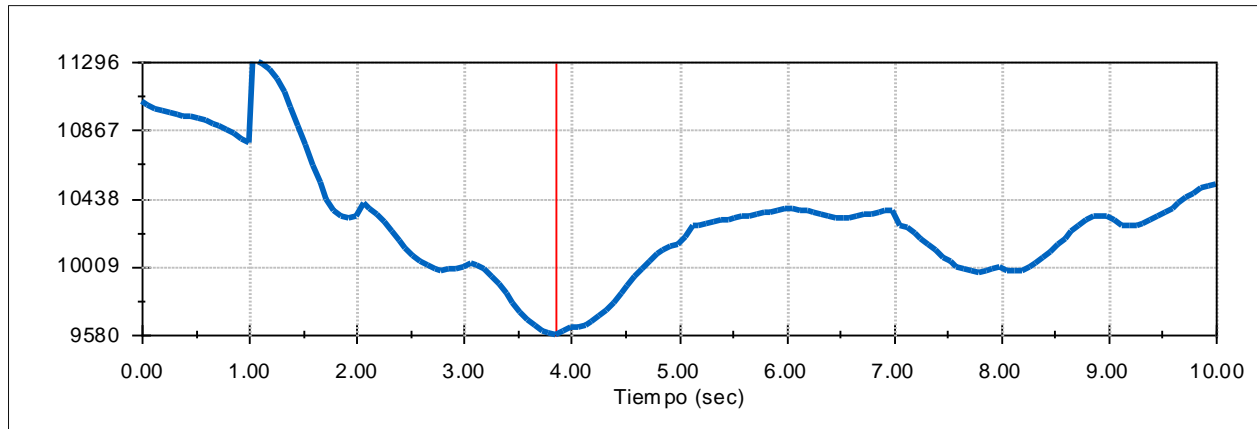


Figura 19. Par servomotor 3. (articulación del codo)

Para el par necesario en el servomotor 3, se puede observar en la figura 19 un pico de 11,3 Nm aproximadamente en el primer segundo, el cual también corresponde a la posición mas crítica del brazo robótico.

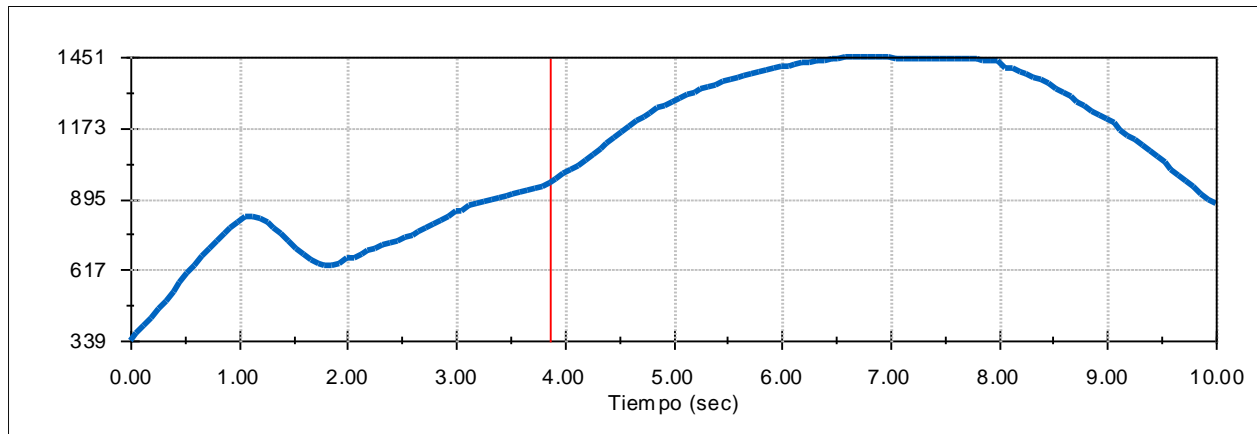


Figura 20. Par servomotor 4. (articulación de la muñeca)

Para el par necesario en el servomotor 4, se puede observar en la figura 20 un pico de 1,45 Nm aproximadamente, el cual será el par mínimo que el servomotor 4 tendrá que suministrar, para que así tenga un correcto funcionamiento en todos los puntos.

Los datos obtenidos de los pares necesarios en esta simulación y en el análisis cinético son muy similares, pero los datos entregados por SolidWorks son más exactos, ya que tienen en cuenta otros factores como la fricción y por esta razón son un poco más grandes.

Ya con estos datos obtenidos, los siguientes resultados entregados por la simulación dinámica de SolidWorks son los de tensión, deformaciones y factor de seguridad, estos fueron calculados para el instante de tiempo de 1 a 3 segundos, donde los servomotores registraban el mayor par y donde la posición del brazo era la más crítica con el brazo casi extendido. Esto ya que los recursos computacionales no permiten realizarlo en toda la simulación y si estos valores son aceptables para los puntos más críticos, lo serán también para los otros puntos.

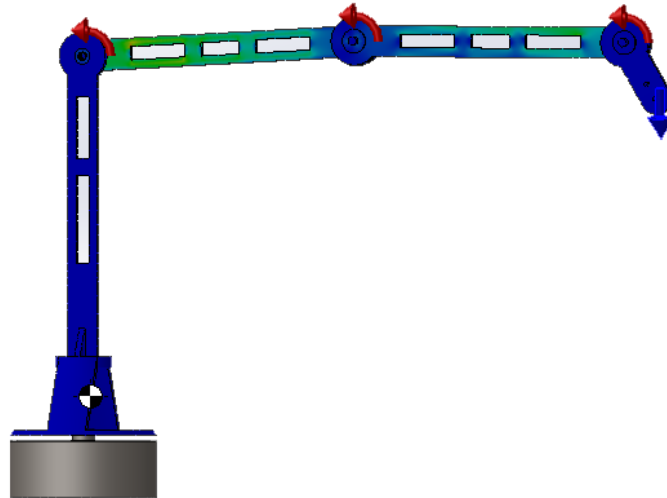


Figura 21. Tensiones brazo robótico.

Para el análisis de tensiones en el brazo robótico, el programa entrega puntos críticos producidos por el movimiento de este, los cuales se pueden observar en un tono desde rojo para los más críticos y azul para los menos críticos en la figura 21 y se encuentran localizados en el eslabón 2 y 3, cuando el brazo robótico está girando por la acción del servomotor de la base. A su vez, la simulación entrega un valor máximo de tensión para todo el brazo robótico calculado, como en el caso estático con la teoría de tensión de Von mises, el cual es de 35 MPa aproximadamente y está ubicado en el eslabón 2, en el primer cambio de sección.

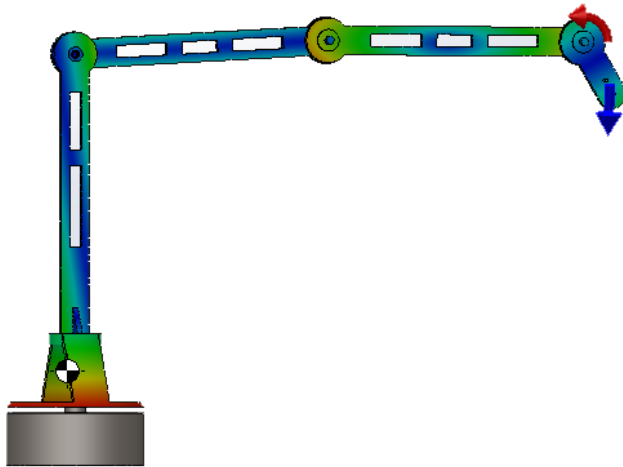


Figura 22. Desplazamientos brazo robótico.

Para el cálculo de los desplazamientos producidos por el movimiento del brazo robótico el programa muestra en una escala de colores azul hasta rojo, de menor a mayor valor de desplazamiento respectivamente. Los valores mas críticos para los desplazamientos están en las articulaciones como se puede observar en la figura 22, y el mayor de todo el brazo robótico es de 0,3941 mm en estos puntos.

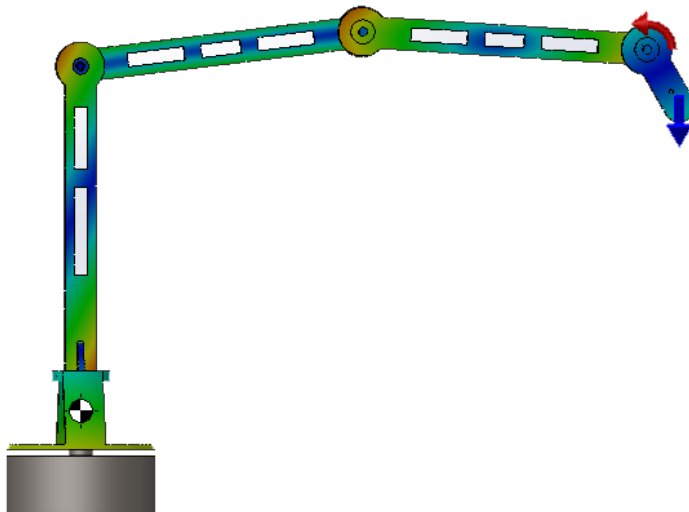


Figura 23. Factor de seguridad.

Para el cálculo del factor de seguridad, el simulador utiliza el criterio de falla de Von Mises, al igual que en el análisis estático. Pero para el análisis de movimiento, entrega un valor promedio para todo el ensamblaje y un valor mínimo.

El valor promedio del ensamblaje para el factor de seguridad es de 7,98 y el valor mínimo de todo el ensamblaje es de 2,44 y esta ubicado en el eslabón 4, en el mismo lugar del análisis estático.

VI. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL.

Para la selección de los servomotores, el factor más relevante es el par mínimo necesario en las articulaciones. Para la articulación del hombro fue necesario un servomotor de uso industrial.

Articulación	Par necesario (Nm)	Servomotor (datos)	Precio (aprox)
Hombro	24,54	Servomotor YASKAWA SGM7G-44AFC61 Torque Nom/Max= 28,4/71,1 Nm Velocidad Nom/Max= 1500/3000RPM Respuesta en Frecuencia 3,1kHz	\$ 3.800.000 1.000 usd
Codo	11,11	KIT SERVOMOTOR 86HB250-156B 127,5 KG/CM NEMA 86 Y DRIVER MICROSTEPPER HB860H Torque 12,5 Nm	\$ 1.400.000


Muñeca	1,38	Servomotor Dynamixel AX- 12A/15,3 Kg · Cm/59 RPM Torque 1,5 Nm	\$219.000
--------	------	---	-----------

Tabla 9. Servomotores seleccionados.

El servomotor industrial para la articulación del hombro genera un par de 28 Nm, el cual es mayor al encontrado por el análisis cinético de 24,54 Nm y por el entregado por el simulador de 26,4 Nm. En la tabla 9 se seleccionaron todos los servomotores con un par un poco mayor al necesario para que los servomotores cumplan satisfactoriamente con todas las condiciones de movimiento y carga.

Para el servomotor de la base se seleccionó el mismo que para el codo, ya que el par necesario para este fue de 11,3 Nm, y el seleccionado para el codo ofrece un par de 12,5 Nm.

Para la selección del controlador se exponen a continuación las ventajas y desventajas de los controladores más comunes en el mercado.

CONTROLADORES	VENTAJAS	DESVENTAJAS
 <p>Figura 8 Controlador específico JOYSTICK S310182</p> <p>Tomado de, www.superrobotica.com</p>	<ul style="list-style-type: none"> • El controlador es una unidad muy compacta. • Permiten mover uno o dos servos de forma manual. • El circuito es capaz de controlar todo tipo de servos estándar. • La alimentación del circuito y los servos se puede realizar con cualquier fuente entre 4 y 6 Voltios. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se utilizan de forma concreta o para una aplicación específica. • Movimientos únicamente en X y Y con una palanca tipo joystick. • Únicamente se pueden manipular dos servomotores.



 <p>Figura 9 Microcontrolador Arduino Uno Tomado de, www.iescamp.es</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Simplifica el proceso de trabajar con microcontroladores. • Las placas Arduino son más accesibles comparadas con otras. • El entorno de programación de Arduino es fácil de usar para principiantes. • El software Arduino es de distribución de licencia libre. 	<ul style="list-style-type: none"> • El hecho de que la plataforma venga ya ensamblada les quita flexibilidad a los proyectos. • Se obliga a usar un espacio y forma acorde con el PCB del Arduino,
 <p>Figura 10 Microcontrolador OpenCm. Tomado de, www.superrobotica.com</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Programación similar al Arduino. • Es un producto económico. • Alta velocidad de comunicación puede alcanzar los 4Mbps. 	<ul style="list-style-type: none"> • Es robusto. • Es un producto exclusivo para el control de motores de la misma marca.

Tabla 10. Selección controladores [15]

De la tabla 10 se seleccionó el microcontrolador Arduino ya que simplifican la programación y su entorno es fácil de usar para principiantes, además, su bajo costo respecto a los otros controladores es un aspecto muy importante ya que minimiza el coste total del proyecto.

Arduino es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo (software), diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios. Arduino es una plataforma abierta que facilita la programación de un microcontrolador [16].

El lenguaje de programación de Arduino está basado en C++. También es posible usar comandos estándar de C++ en la programación de Arduino y este es un lenguaje de medio nivel [16].

Teniendo ya seleccionado el microcontrolador, se procede a realizar el plano eléctrico necesario para realizar las conexiones de los servos.

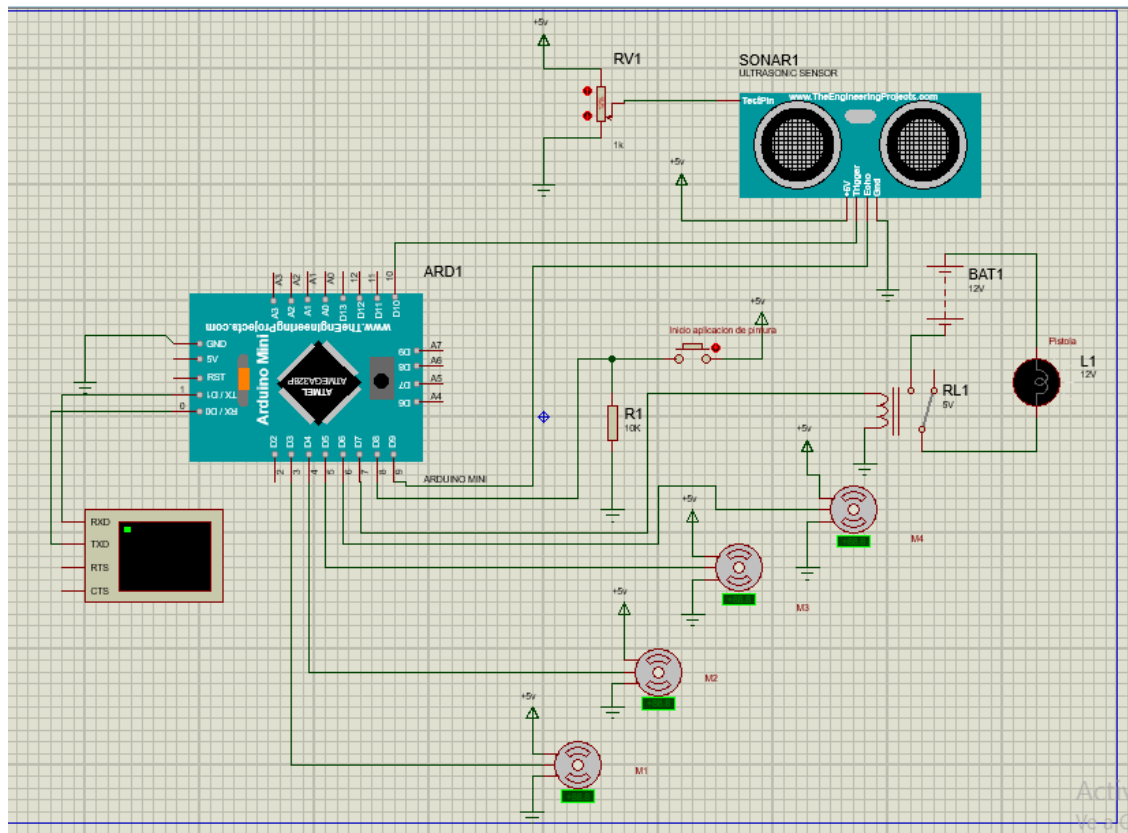


Figura 24. Plano eléctrico.

Para conservar siempre la distancia de 30 cm recomendada entre la pistola y la superficie [9] se agregó un sensor ultrasónico de proximidad, el cual será el encargado de esta función. En la figura 13 se muestra el plano eléctrico con el sensor y los servomotores conectados.

Programa que controlara los movimientos del brazo robótico:

Para hacer un programa que controle correctamente los movimientos del brazo robótico, se procedió primero a plantear un camino que la pistola debía seguir, para ello se seleccionaron 55 puntos por los que la pistola deberá pasar. En los espacios entre un punto y otro su posición será controlada por el sensor ultrasónico de proximidad, el cual estará programado para conservar siempre 30 cm.

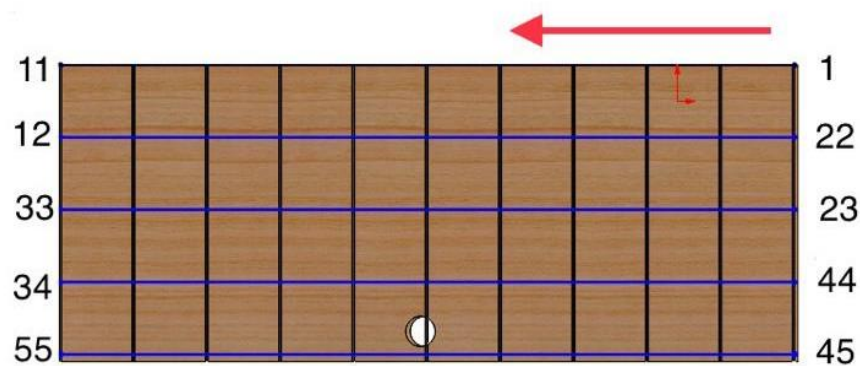


Figura 25. Puntos y camino seleccionado.

Para los puntos seleccionados se tomó una distancia de 20 cm entre punto y punto, siendo el punto 1 el inicio del camino que debe seguir la pistola de pintura y el punto 55 el final, donde terminará de pintar la puerta.

Angulo servo 3	Angulo servo 2	Angulo servo 1	Angulo servo 4
154,5256627	122,7202793	24,62	180
113,759273	146,5734721	29,81	180
90,79780882	162,5158035	37,37	180
74,70145816	175,9770088	48,88	180
64,49719116	186,4112207	66,42	180
60,91825889	190,655034	90	180
64,49719116	186,4112207	113,58	180
74,70145816	175,9770088	131,12	180
90,79780882	162,5158035	142,63	180
113,759273	146,5734721	150,19	180
154,5256627	122,7202793	155,38	180
137,4012157	121,6042408	155,38	169
103,6640287	140,40696	150,19	169
81,21409264	154,2298655	142,63	169
64,49973831	165,9502312	131,12	169

53,32879916	175,1370144	113,58	169
49,25273206	178,9498726	90	169
53,32879916	175,1370144	66,42	169
64,49973831	165,9502312	48,88	169
81,21409264	154,2298655	37,37	169
103,6640287	140,40696	29,81	169
137,4012157	121,6042408	24,62	169
132,887099	113,5564505	24,62	156,44
100,4089382	129,7955309	29,81	156,44
77,9773511	141,0113244	37,37	156,44
60,91734832	149,5413258	48,48	156,44
49,24864695	155,3756765	66,42	156,44
44,90492142	157,5475393	90	156,44
49,24864695	155,3756765	113,58	156,44
60,91734832	149,5413258	131,12	156,44
77,9773511	141,0113244	142,63	156,44
100,4089382	129,7955309	150,19	156,44
132,887099	113,5564505	155,38	156,44
137,4012157	100,9945435	155,38	148,4
103,6640287	115,9290113	150,19	148,4
81,21409264	124,5560418	142,63	148,4
64,49973831	129,5500305	131,12	148,4
53,32879916	131,5341864	113,58	148,4
49,25273206	131,7973953	90	148,4
53,32879916	131,5341864	66,42	148,4
64,49973831	129,5500305	48,48	148,4
81,21409264	124,5560418	37,37	148,4
103,6640287	115,9290113	29,81	148,4
137,4012157	100,9945435	24,62	148,4
154,5256627	82,75405797	24,62	147,29

113,759273	99,66725496	29,81	147,29
90,79780882	106,6863877	37,37	147,29
74,70145816	109,321533	48,48	147,29
64,49719116	109,0915881	66,42	147,29
60,91825889	108,4267071	90	147,29
64,49719116	109,0915881	113,58	147,29
74,70145816	109,321533	131,12	147,29
90,79780882	106,6863877	142,63	147,29
113,759273	99,66725496	150,19	147,29
154,5256627	82,75405797	155,38	147,29

Tabla 11. Ángulos para los servomotores en todos los puntos.

Los ángulos de la tabla 10 se hallaron por medio de trigonometría, en una hoja de cálculo de *Excel*. Son los que posteriormente serán agregados al programa y la ubicación de los servos 1, 2, 3, 4 están descritos en la figura 14, para que así el brazo robótico los siga uno a uno.

El programa que describirá el movimiento del servomotor es el siguiente. En él se ingresaron los ángulos para cada servomotor en los 55 puntos correspondientes.

// Cabecera del programa

```
#include <Servo.h>
```

```
int Trig = 10; // Pin Trig Sensor Ultrasonico de distancia
```

```
int Eco = 9; // Pin ECo Sensor Ultrasonico de distancia
```

```
int Pistola = 7;
```

```
int Distancia;
```

```
int Time;
```

```
int Encendido = 8;
```

```
Servo M1;
```

```
Servo M2;
```

```
Servo M3;
```

```
Servo M4;
```

En esta parte del código se declaran las bibliotecas y variables asociadas a los pines a utilizar en el arduino

```

//.....

///..... Configuración de los pines del arduino

void setup() {

    //Asignacion de Pines digitales de salida para cada servo motor M1, M2. M3. M4 corresponden
    a cada servomotor del brazo robotico

    M1.attach(3); // Asigno M1 al pin digital 3 del arduino el cual envía un pulso para controlar el
    servomotor
    M2.attach(4);
    M3.attach(5);
    M4.attach(6);
    //Sensor de Distancia
    pinMode(Trig,OUTPUT); //PIN de disparo del sensor ultrasonico como salida
    pinMode(Eco, INPUT); ///PIN Eco como entrada
    pinMode(Pistola, OUTPUT);// Pien como salida para encender y apagar la pistola de pintura
    pinMode(Encendido, INPUT);//PIn como entrada para determinar el inicio del sistema
    Serial.begin(9600);//Vizualizacion serial o Interfaz maquina Hombre
}
// Configuración de los pines del arduino y el sensor ultrasónico para poder leer la distancia

void loop() { // En esta parte se realiza el algoritmo para controlar el brazo robotico
    //Encendido

    /:.....Lectura del sensor ultrasónico de distancia
    digitalWrite(Trig, HIGH); //Escribo un //bit en alto en el pin De disparo
    delay(1); //espero 1 segundo
    digitalWrite(Trig, LOW); //Escribo un //bit en bajo en el pin De Eco
    Time=pulseIn(Eco,HIGH);
    Distancia=Time/58.2; /:.....: Calculo de la distancia en cm
    Serial.print("Distancia:cm \n");/:.....:Impresión de la distancia
    delay(200); /:.....: Tiempo de espera para visualizar la lectura
    Serial.println(Distancia);/:.....:Impresión
    delay(200);

    /:.....: Se ponen los servos a cero
        M1.write(0);
        M2.write(0);
        M3.write(0);
        M4.write(0);
        delay(20);

    /:.....:

```

```

int lectura= digitalRead(Encendido);  /:.....:Lectura del encendido del sistema

if(lectura==HIGH) /:.....: Si se pulsa el botón de encendido se posiciona el brazo en la
posición P1
    {
// Posicionamiento del Brazo.
    //P1.....
    M1.write(24.62);
    M2.write(122.7202793);
    M3.write( 154.5256627);
    M4.write(180);
    delay(200); /:.....: Esperamos 2 segundos
//:.....:Calculo de la distancia entre la puerta y la pistola

    digitalWrite(Trig, HIGH); //Escribo un //bit en alto en el pin De disparo
    delay(1); //espero 1 segundo
    digitalWrite(Trig, LOW); //Escribo un //bit en bajo en el pin De Eco
    Time=pulseIn(Eco,HIGH);
    Distancia=Time/58.2;
    Serial.println(Distancia);
    delay(200);

    if(Distancia==30){ /:.....: Si la distancia es igual a 30 cm, se enciende la pistola de
pintura y el brazo se mueve mediante los puntos P1 hasta P55

        digitalWrite(Pistola,HIGH); //Encendido Pistola
        Serial.print("Pintando No se acerque \n");
        delay(20);

        //P1..... Se asignan los ángulos a los respectivos servos por cada
punto.

        // M1.write(24.62);
        // M2.write(122.7202793);
        // M3.write(154.5256627);
        // M4.write(180);
        //Inicio de pintado
        delay(20);
        //P2.....// Puntos o coordenadas
        M1.write(29.81);
        M2.write(146.5734721);
        M3.write(113.759273);
        M4.write(180);
        delay(200);

```

```

///P3.....
M1.write(37.37);
M2.write(162.5158035);
M3.write(90.79780882);
M4.write(180);
delay(200);
///P4.....
M1.write(48.88);
M2.write(175.9770088);
M3.write(74.70145816);
M4.write(180);
delay(200);
///P5.....
M1.write(66.42);
M2.write(186.4112207);
M3.write(64.49719116);
M4.write(180);
delay(200);
///P6.....
M1.write(90);
M2.write(190.655034);
M3.write(60.91825889);
M4.write(180);
delay(200);
///P7.....
M1.write(113.58);
M2.write(186.4112207);
M3.write(64.49719116);
M4.write(180);
delay(200);
///P8.....
M1.write(131.12);
M2.write(175.9770088);
M3.write(74.70145816);
M4.write(180);
delay(200);
///P9.....
M1.write(142.63);
M2.write(162.5158035);
M3.write(90.79780882);
M4.write(180);
delay(200);
///P10.....

```



```

M1.write(150.19);
M2.write(146.5734721);
M3.write(113.759273);
M4.write(180);
delay(200);
//P11.....
M1.write(155.38);
M2.write(122.7202793);
M3.write(154.5256627);
M4.write(180);
delay(200);
//P12.....
M1.write(155.38);
M2.write(121.6042408);
M3.write(137.4012157);
M4.write(169);
delay(200);
//P13.....
M1.write(150.19);
M2.write(140.40696);
M3.write(103.6640287);
M4.write(169);
delay(200);
//P14.....
M1.write(142.63);
M2.write(154.2298655);
M3.write(81.21409264);
M4.write(169);
delay(200);
//P15.....
M1.write(131.12);
M2.write(165.9502312);
M3.write(64.49973831);
M4.write(169);
delay(200);
//P16.....
M1.write(113.58);
M2.write(175.1370144);
M3.write(53.32879916);
M4.write(169);
delay(200);
//P17.....
M1.write(90);

```

```

M2.write(178.9498726);
M3.write(49.25273206);
M4.write(169);
delay(200);
//P18.....
M1.write(66.42);
M2.write(175.1370144);
M3.write(53.32879916);
M4.write(169);
delay(200);
//P19.....
M1.write(48.88);
M2.write(165.9502312);
M3.write(64.49973831);
M4.write(169);
delay(200);
//P20.....
M1.write(37.37);
M2.write(154.2298655);
M3.write(81.21409264);
M4.write(169);
delay(200);
//P21.....
M1.write(29.81);
M2.write(140.40696);
M3.write(103.6640287);
M4.write(169);
delay(200);
//P22.....
M1.write(24.62);
M2.write(121.6042408);
M3.write(137.4012157);
M4.write(169);
delay(200);
//P23.....
M1.write(24.62);
M2.write(113.5564505);
M3.write(132.887099);
M4.write(156.44);
delay(200);
//P24.....
M1.write(29.81);
M2.write(129.7955309);

```

```

M3.write(100.4089382);
M4.write(156.44);
delay(200);
//P25.....
M1.write(37.37);
M2.write(141.0113244);
M3.write(77.9773511);
M4.write(156.44);
delay(200);
//P26.....
M1.write(48.48);
M2.write(149.5413258);
M3.write(91.54927906);
M4.write(156.44);
delay(200);
//P27.....
M1.write(66.42);
M2.write(155.3756765);
M3.write(49.24864695);
M4.write(156.44);
delay(200);
//P28.....
M1.write(90);
M2.write(157.5475393);
M3.write(44.90492142);
M4.write(156.44);
delay(200);
//P29.....
M1.write(113.58);
M2.write(155.3756765);
M3.write(49.24864695);
M4.write(156.44);
delay(200);
//P30.....
M1.write(131.12);
M2.write(149.5413258);
M3.write(60.91734832);
M4.write(156.44);
delay(200);
//P31.....
M1.write(142.63);
M2.write(141.0113244);
M3.write(77.9773511);

```

```

M4.write(156.44);
delay(200);
//P32.....
M1.write(150.19);
M2.write(129.7955309);
M3.write(100.4089382);
M4.write(156.44);
delay(200);
//P33.....
M1.write(155.38);
M2.write(113.5564505);
M3.write(132.887099);
M4.write(156.44);
delay(200);
//P34.....
M1.write(155.38);
M2.write(100.9945435);
M3.write(137.4012157);
M4.write(148.4);
delay(200);
//P35.....
M1.write(150.19);
M2.write(115.9290113);
M3.write(103.6640287);
M4.write(148.4);
delay(200);
//P36.....
M1.write(142.63);
M2.write(124.5560418);
M3.write(81.21409264);
M4.write(148.4);
delay(200);
//P37.....
M1.write(131.12);
M2.write(129.5500305);
M3.write(64.49973831);
M4.write(148.4);
delay(200);
//P38.....
M1.write(113.58);
M2.write(131.5341864);
M3.write(53.32879916);
M4.write(148.4);

```

```

delay(200);
  ///P39.....
M1.write(90);
M2.write(131.7973953);
M3.write(49.25273206);
M4.write(148.4);
delay(200);
  ///P40.....
M1.write(66.42);
M2.write(131.5341864);
M3.write(53.32879916);
M4.write(148.4);
delay(200);
  ///P41.....
M1.write(48.48);
M2.write(129.5500305);
M3.write(64.49973831);
M4.write(148.4);
delay(200);
  ///P42.....
M1.write(37.37);
M2.write(124.5560418);
M3.write(81.21409264);
M4.write(148.4);
delay(200);
  ///P43.....
M1.write(29.81);
M2.write(115.9290113);
M3.write(103.6640287);
M4.write(148.4);
delay(200);
  ///P44.....
M1.write(24.62);
M2.write(100.9945435);
M3.write(137.4012157);
M4.write(148.4);
delay(200);
  ///P45.....
M1.write(24.62);
M2.write(82.75405797);
M3.write(154.5256627);
M4.write(147.29);
delay(200);

```

```

    ///P46.....
M1.write(29.81);
M2.write(99.66725496);
M3.write(113.759273);
M4.write(147.29);
delay(200);
    ///P47.....
M1.write(37.37);
M2.write(106.6863877);
M3.write(90.79780882);
M4.write(147.29);
delay(200);
    ///P48.....
M1.write(48.48);
M2.write(109.321533);
M3.write(74.70145816);
M4.write(147.29);
delay(200);
    ///P49.....
M1.write(66.42);
M2.write(109.0915881);
M3.write(64.49719116);
M4.write(147.29);
delay(200);
    ///P50.....
M1.write(90);
M2.write(108.4267071);
M3.write(60.91825889);
M4.write(147.29);
delay(200);
    ///P51.....
M1.write(113.58);
M2.write(109.0915881);
M3.write(64.49719116);
M4.write(147.29);
delay(200);
    ///P52.....
M1.write(131.12);
M2.write(109.321533);
M3.write(74.70145816);
M4.write(147.29);
delay(200);
    ///P53.....

```

```

        M1.write(142.63);
        M2.write(106.6863877);
        M3.write(90.79780882);
        M4.write(147.29);
        delay(200);
        ///P54.....
        M1.write(150.19);
        M2.write(99.66725496);
        M3.write(113.759273);
        M4.write(147.29);
        delay(200);
        ///P55.....
        M1.write(155.38);
        M2.write(82.75405797);
        M3.write(154.5256627);
        M4.write(147.29);
        delay(200);
/::::::::: Finaliza el recorrido se apaga la pistola y los servos regresan al punto inicial P1
        Serial.print("Terminado \n");
        delay(100);

        digitalWrite(Pistola,LOW); //Pistola Apagada
        //Fin recorrid  }

//Posicionamiento de nuevo de la pistola hasta que se tengan los 30 cm para iniciar
/:: En esta parte se reinicia la posición de los servos y se apaga la pistola, para posicionar el brazo
a los 30 cm
    else{
        digitalWrite(Pistola,LOW);
        Serial.print("Posicionar Bien la puerta \n");
        delay(2000) ;
        M1.write(0);
        M2.write(0);
        M3.write(0);
        M4.write(0);
        delay(20);
        ///P1.....
        M1.write(24.62);
        M2.write(122.7202793);
        M3.write(154.5256627);
        M4.write(180);
        delay(2000);
    }
}

```

CONCLUSIONES.

Se realizó un modelado en CAD en la herramienta SolidWorks el cual arrojó un dimensionamiento, el cual permitirá llegar a una etapa posterior de fabricación del prototipo.

Se realizó un sistema de control del robot en un lenguaje apropiado, el cual va ser manejado por el controlador Arduino y va garantizar un correcto funcionamiento del brazo robótico para aplicación de pintura.

En conclusión, el diseño inicial del brazo robótico va soportar las condiciones de carga y de movimiento necesarias, ya que se pudo obtener un factor de seguridad mínimo para todo el ensamblaje mayor al recomendado.

El programa de Arduino contiene todos los movimientos precalculados, lo que implica que su trayectoria es fija. Esto es suficiente para el desempeño básico del robot, para pintar una pieza de un tamaño predeterminado.

Sin embargo, mediante variaciones de generalización en la programación, se puede ingresar una trayectoria nueva, para pintar otro tipo de piezas. Con algunos ajustes al programa, pudiera hacerse un ingreso de nuevas trayectorias desde un computador.

BIBLIOGRAFÍA:

- [1] GRAETZ, Georg y GUY, Michaels. Robots at Work. Centre for Economic Performance at the London School of Economics, 2015. Universidad de Uppsala Suecia, London School of Economics.1993-2007.
- [2] CARDONA, M. Solution of Forward Kinematics for Serial Robots using Successive Screws, Proc. of IEEE 32th Edition of the Central America and Panama Convention, 2012.
- [3] CARDONA, M. Dimensional Synthesis of 3RRR Planar Parallel Robots for Well-Conditioned Workspace. IEEE Latin America Transactions, pp. 409-415, 2015.
- [4] GONZALEZ, Víctor R. Control y Robótica. Tema: Fundamentos de robótica. Curso provincial. CFIE Valladolid II. Asesoría de Tecnología y FP, 2007
- [5] GONZALEZ, Víctor R. Control y Robótica. extensión: Robótica, Tema 5, universidad de Guadalajara, México. 2010.
- [6] FELIX VILLAR, María. Tareas repetitivas I: identificación de riesgos para la extremidad superior. Centro nacional de nuevas tecnologías. Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo.2019.
- [7] MANCHEÑO POTENCIANO, María del Carmen e IZQUIERDO GARCIA, Miguel Ángel. Exposición laboral a disolventes. Secretaría de Salud Laboral y Medio Ambiente. Capítulo 2. Efectos para la salud y el medio ambiente. 2018.
- [8] YI CAO, KE LU, XIUJUAN LI y YI ZANG. Accurate Numerical Methods for Computing 2D and 3D Robot Workspace [Journal] // International Journal of Advanced Robotic Systems: INTEC. – 6: Vol. VIII – pp. 1-13.2011.
- [9] HECTOR. Pintar con pistola: Consejos y técnica para pulverizar correctamente. Airless discount. 2016.
- [10] CALLE T, G; QUINTERO R, H; DÍAZ A, A; HENAO C, E. Notas de clase de Mecánica de Maquinaria. Universidad Tecnológica de Pereira. Universidad Tecnológica de

Pereira.<https://sites.google.com/a/utp.edu.co/hector-fabio-quintero/mecanica-de-maquinaria>. 2017.

[11] YASKAWA. Catalogo guía de instalación servomotor SGM7G-03A7C61 hoja de datos Catálogo PDF SGM7G-03A7C61 Hoja de datos PDF.2020.

[12] EQUIPO FERROS PLANOS. Tipos de acero inoxidable en el mecanizado, los más usados. Disponible en <https://ferrosplanes.com/tipos-de-acero-inoxidable-en-el-mecanizado-los-mas-usados/1>. 2018.

[13] BEER, JOHNSTON, MAZUREK y EISENBERG. Mecánica Vectorial para Ingenieros Estática. McGraw Hill Interamericana. novena edición. 2013.

[14] NORTON, Robert L. Diseño de Máquinas. México: Ed. Prentice-Hall (Pearson), 1999.

[15] BARCO GONZALEZ, Franklin Olmedo y LARA, Jhon Álvaro. Diseño y construcción de un prototipo de robot tipo delta. Universidad distrital francisco José de caldas. 2018.

[16] ARDUINO. aprendiendo Arduino, WordPress-lenguaje de programación. blog Arduino disponible en: <https://www.arduino.cc/>. 2015

ANEXOS.

PLANOS DE FABRICACIÓN.

Plano 1: Base.

Plano 2: Soporte para eslabón 1.

Plano 3: Eslabón 1.

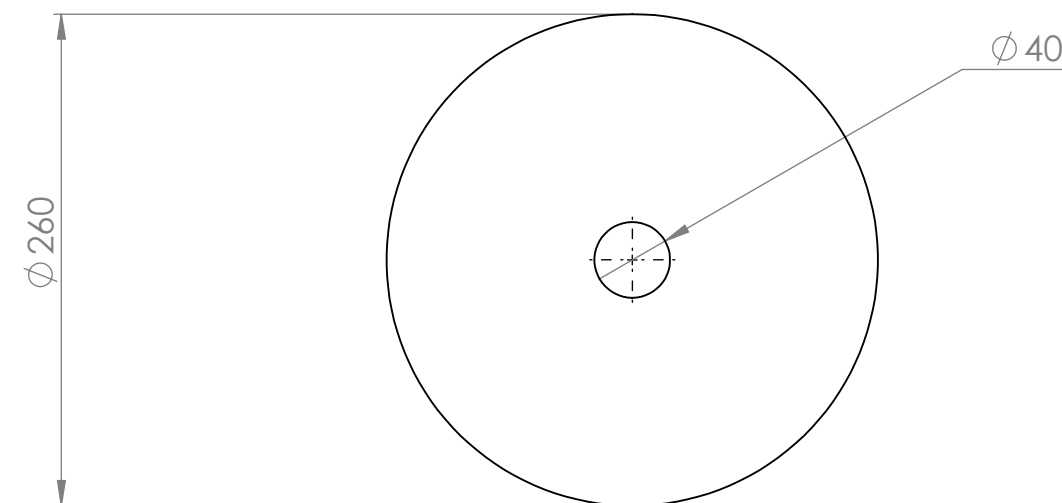
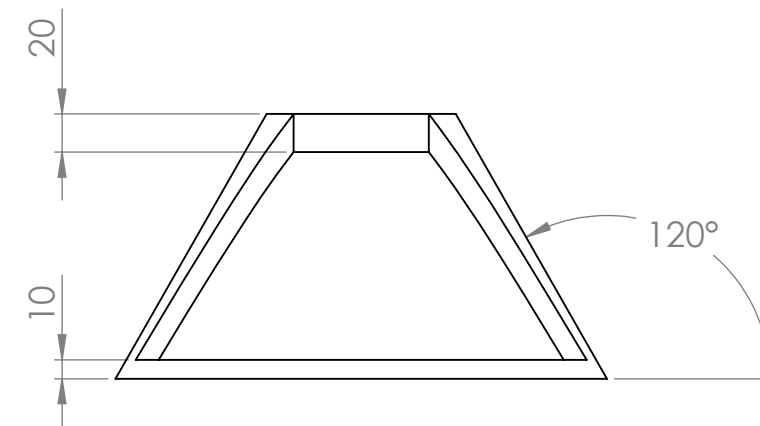
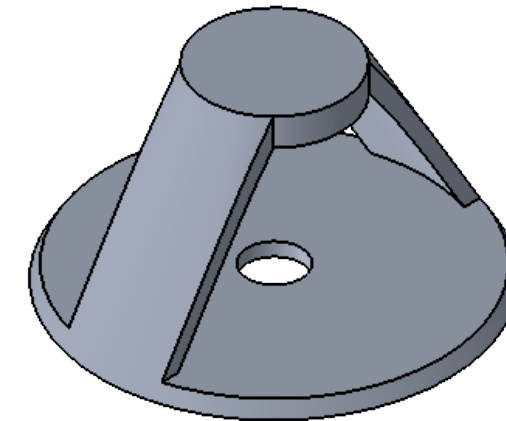
Plano 4: Eje unión eslabón 1-2, 2-3 y 3-4.

Plano 5: Eslabón 2

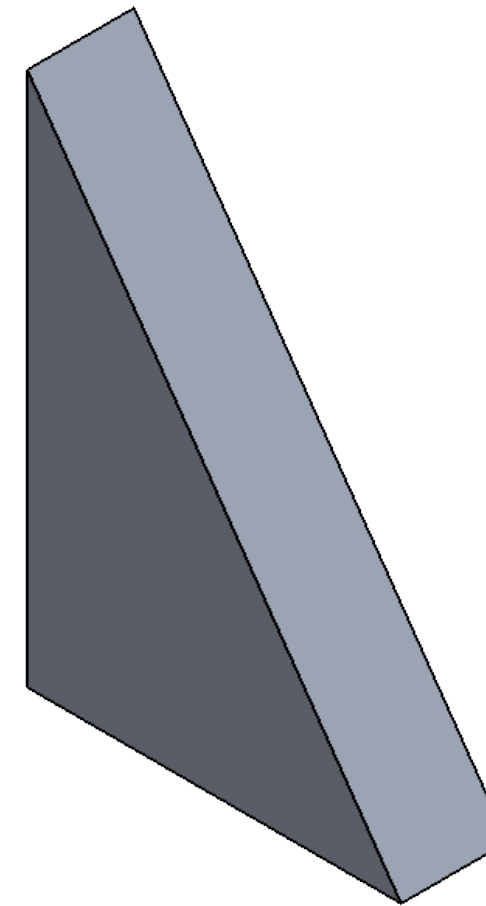
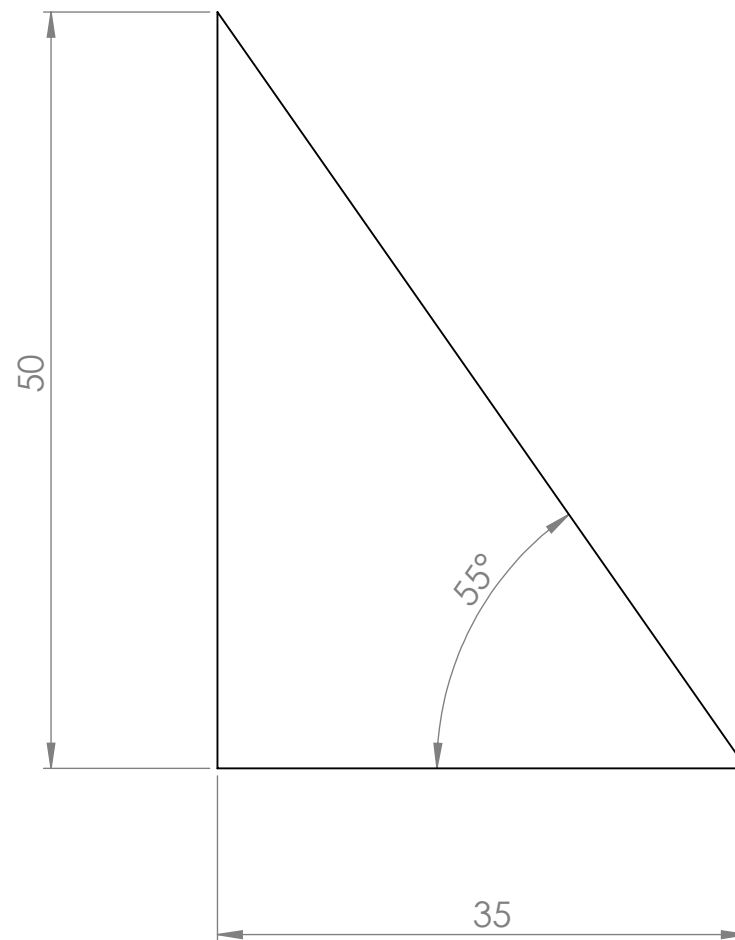
Plano 6: Eslabón 3

Plano 7: Eslabón 4

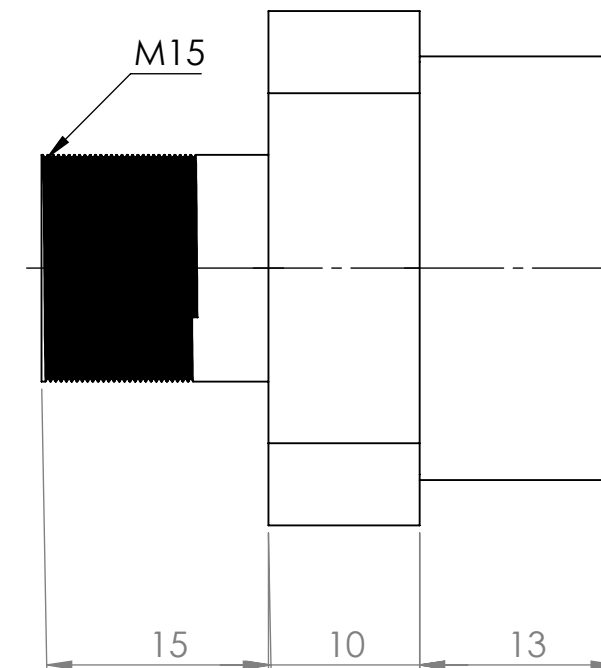
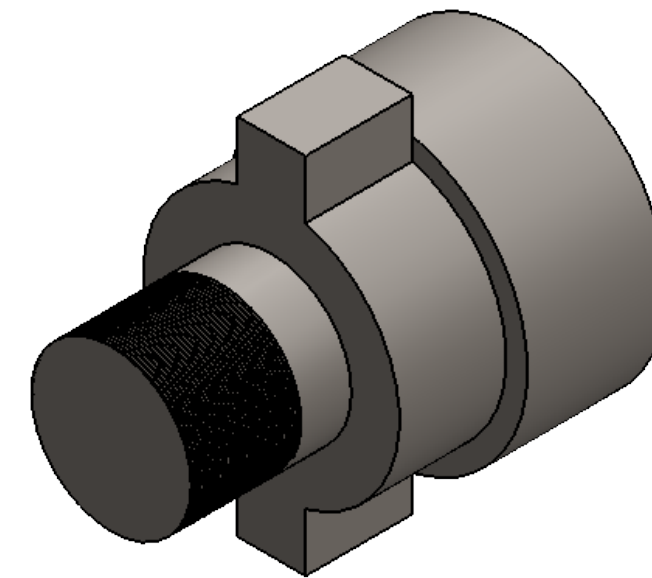
Plano 8: Seguro de pistola.



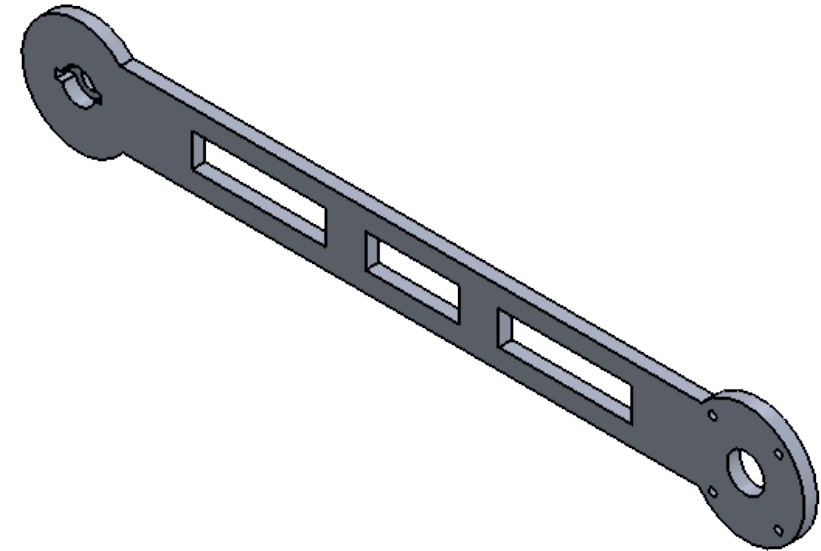
	FECHA	CÓDIGO	NOMBRE			UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA		
DIBUJÓ	06/2020	1088330360	Ricardo A. Jara Bedoya.			FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA		
REVISÓ								
MEDIDAS	TITULO DEL PROYECTO					MATERIA		
mm	Brazo Robotico Aplicacion Pintura.					GRUPO Trabajo de grado.		
ESCALA	DESCRIPCION DE PIEZAS DE ESTE PLANO						PLANO No:	1
1:1	No.pieza	Material	Codigo	No.pieza	Material	Codigo		



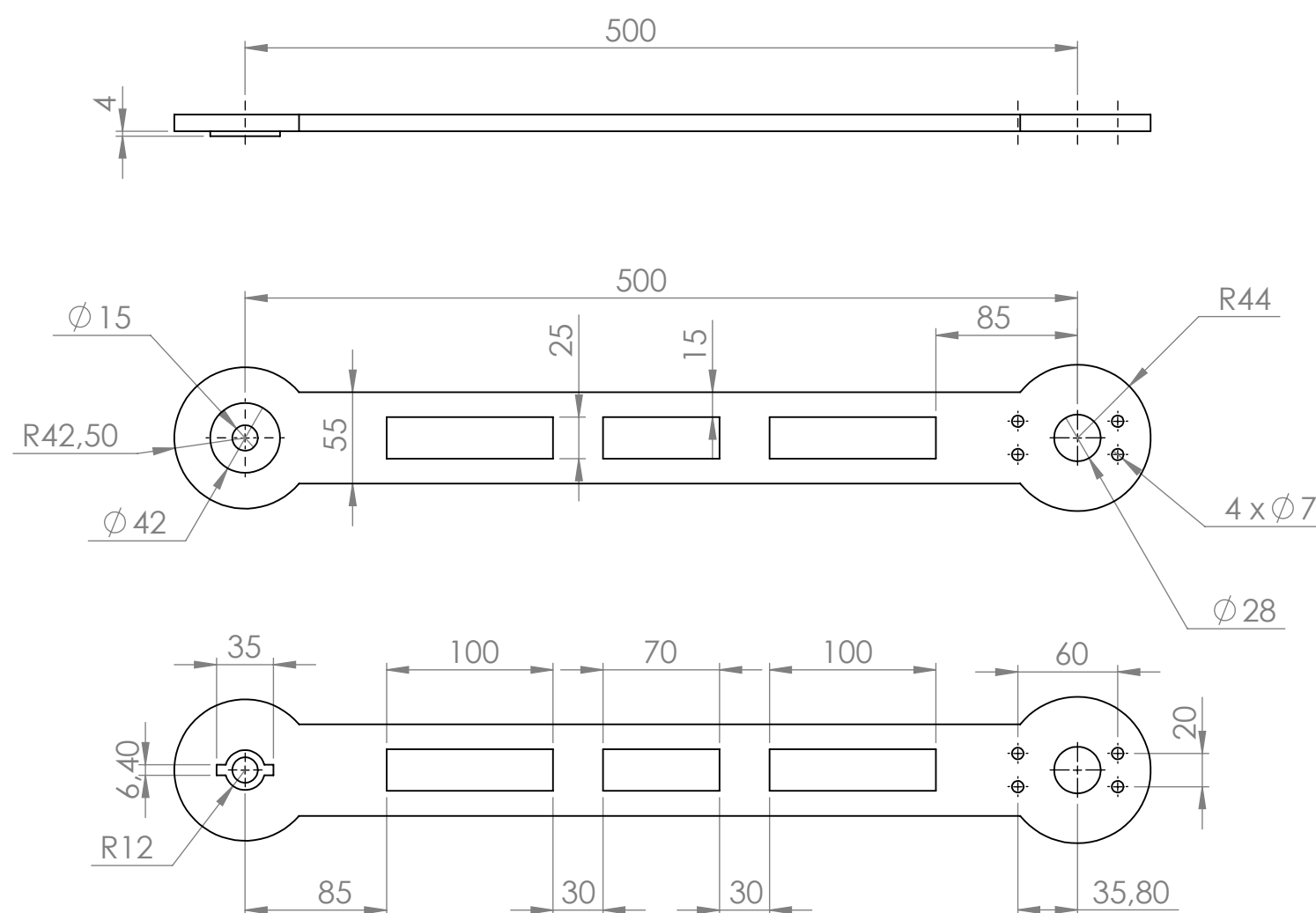
	FECHA	CÓDIGO	NOMBRE			UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA		
DIBUJÓ	06/2020	1088330360	Ricardo A. Jara Bedoya.			FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA		
REVISÓ								
MEDIDAS	TITULO DEL PROYECTO					MATERIA		
mm	Brazo Robotico Aplicacion Pintura.					GRUPO Trabajo de grado.		
ESCALA	DESCRIPCION DE PIEZAS DE ESTE PLANO						PLANO No:	2
1:1	No.pieza	Material	Codigo	No.pieza	Material	Codigo		



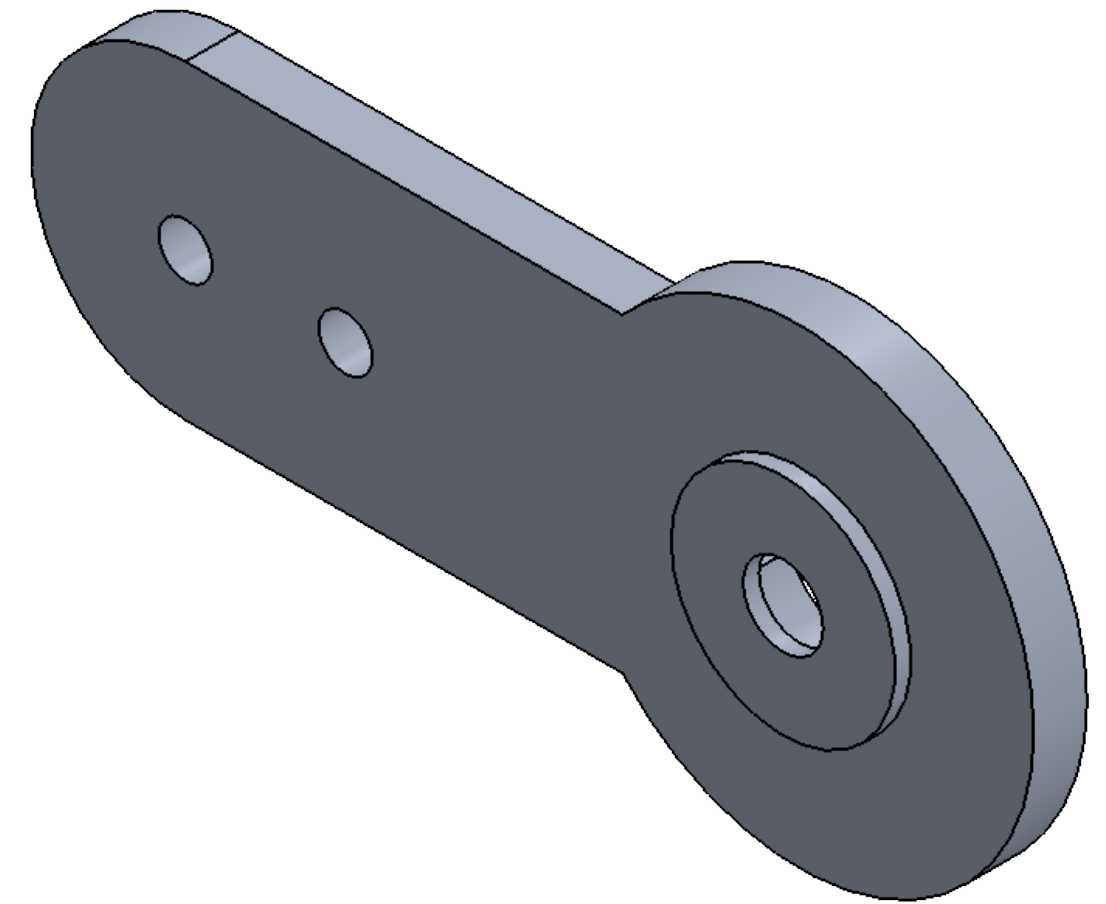
	FECHA	CÓDIGO	NOMBRE			UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA		
DIBUJÓ	06/2020	1088330360	Ricardo A. Jara Bedoya.			FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA		
REVISÓ								
MEDIDAS	TITULO DEL PROYECTO					MATERIA		
mm	Brazo Robotico Aplicacion Pintura.					GRUPO Trabajo de grado.		
ESCALA	DESCRIPCION DE PIEZAS DE ESTE PLANO						PLANO No:	4
1:1	No.pieza	Material	Codigo	No.pieza	Material	Codigo		

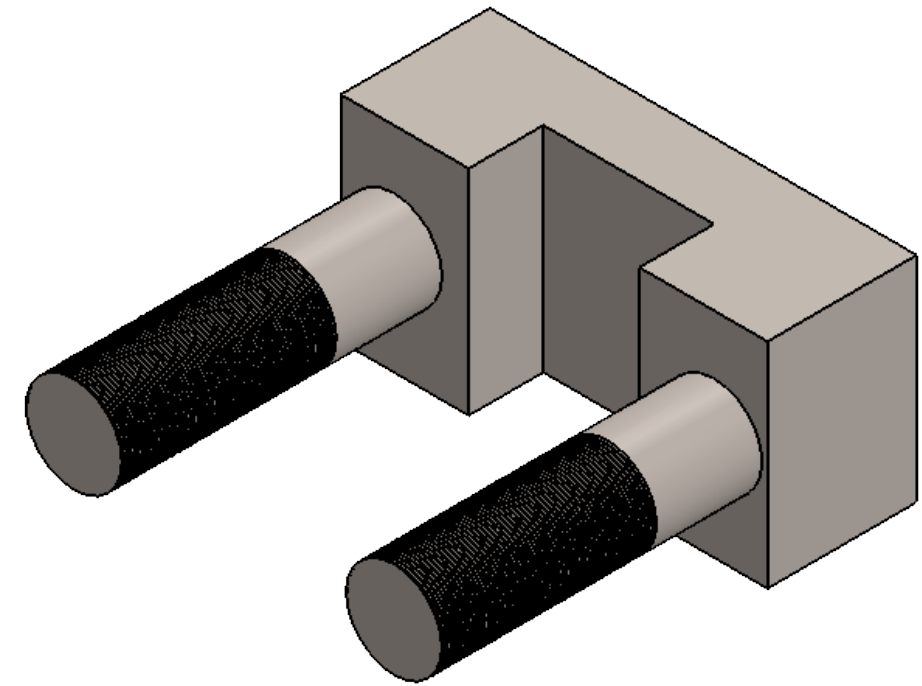
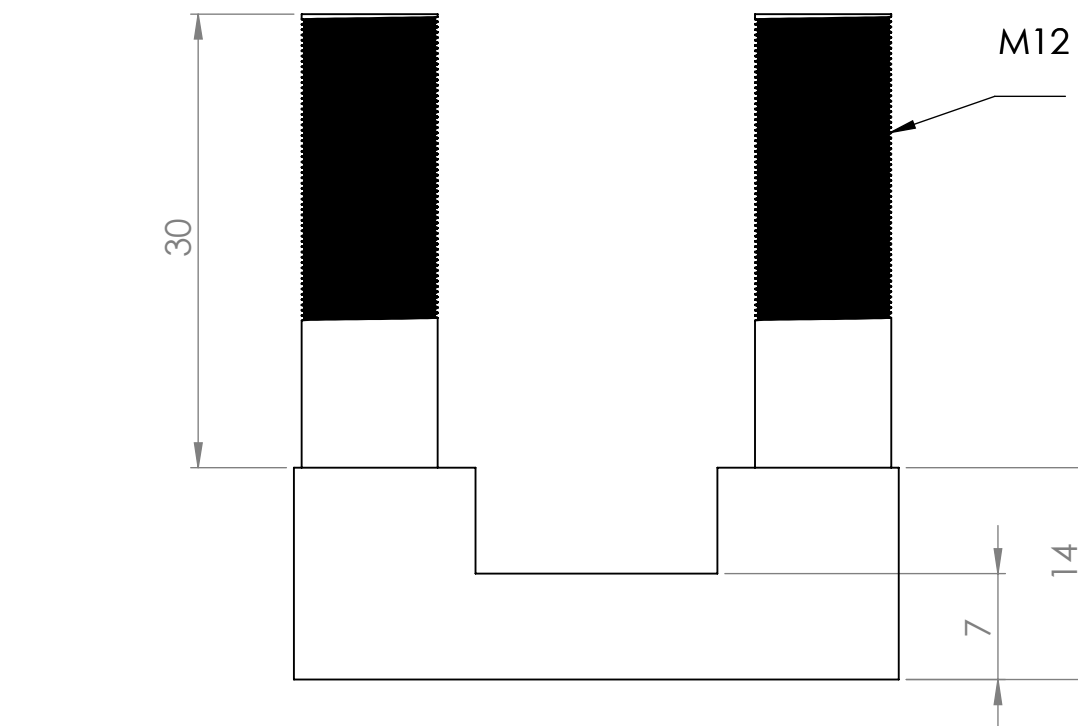


	FECHA	CÓDIGO	NOMBRE			UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA		
DIBUJÓ	06/2020	1088330360	Ricardo A. Jara Bedoya.			FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA		
REVISÓ								
MEDIDAS	TITULO DEL PROYECTO					MATERIA		
mm	Brazo Robotico Aplicacion Pintura.					GRUPO Trabajo de grado.		
ESCALA	DESCRIPCION DE PIEZAS DE ESTE PLANO						PLANO No:	5
1:1	No.pieza	Material	Codigo	No.pieza	Material	Codigo		



	FECHA	CÓDIGO	NOMBRE			UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA		
DIBUJÓ	06/2020	1088330360	Ricardo A. Jara Bedoya.			FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA		
REVISÓ								
MEDIDAS	TITULO DEL PROYECTO					MATERIA		
mm	Brazo Robotico Aplicacion Pintura.					GRUPO Trabajo de grado.		
ESCALA	DESCRIPCION DE PIEZAS DE ESTE PLANO						PLANO No:	6
1:1	No.pieza	Material	Codigo	No.pieza	Material	Codigo		





	FECHA	CÓDIGO	NOMBRE			UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA		
DIBUJÓ	06/2020	1088330360	Ricardo A. Jara Bedoya.			FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA		
REVISÓ								
MEDIDAS	TITULO DEL PROYECTO					MATERIA		
mm	Brazo Robotico Aplicacion Pintura.					GRUPO Trabajo de grado.		
ESCALA	DESCRIPCION DE PIEZAS DE ESTE PLANO						PLANO No:	8
	No.pieza	Material	Codigo	No.pieza	Material	Codigo		
1:1								